



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

APLIKACE MODERNÍCH METOD PRO VÝROBU ODKLÁDACÍHO STOJANU NA MOBILNÍ TELEFON

APPLICATION OF MODERN METHODS FOR PRODUCTION OF MOBILE
PHONE STORAGE STAND

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Jaroslav TESAŘ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. Josef SEDLÁK, Ph.D.

BRNO 2012

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2011/12

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Jaroslav Tesař

který/která studuje v bakalářském studijním programu

obor: **Strojírenská technologie (2303R002)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Aplikace moderních metod pro výrobu odkládacího stojanu na mobilní telefon

v anglickém jazyce:

Application of modern methods for production of mobile phone storage stand

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

1. Úvod
2. Popis technologie reverzního inženýrství
3. Popis technologie Rapid Prototyping
4. Experimentální část
5. Technicko-ekonomické zhodnocení
6. Závěr

Cíle bakalářské práce:

Cílem bakalářské práce je realizace a výroba odkládacího stojanu na mobilní telefon s využitím moderních technologií a metod. Stojan bude naskenován pomocí 3D skeneru a upraven v programu SolidWorks. Vytvoření stojanu bude provedeno pomocí 3D tiskárny uPrint. Jako alternativní výroba stojanu bude použita technologie odlévání pomocí vakuového lícího systému.

Seznam odborné literatury:

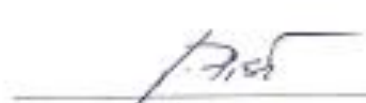
1. PÍŠKA, M. a kolektiv. Speciální technologie obrábění. CERM 1.vyd. 246 s. 2009. ISBN 978-80-214-4025-8.
2. JACOBSON, D. M., RENNIE, A. E. W., BOCKING C. E. In Proceedings of the 5th National Conference on Rapid Design, Prototyping, and Manufacture. Professional Engineering Publishing, 2004, pp.112. ISBN 1860584659.
3. PÍŠA, Z., KEJDA, P., GÁLOVÁ, D. Rapid Prototyping in Mechanical Engineering. In Proceedings of the Abstracts 12th International Scientific Conference CO-MA-TECH 2004. Bratislava: STU, 2004. s. 160. ISBN 80-227-2121-2.
4. SEDLÁK, J., PÍŠA, Z. Rapid Prototyping master modelů pomocí CAD/CAM systémů. In Mezinárodní vědecká konference 2005. Ostrava: VŠB TU Ostrava, Fakulta strojní, 07.09.2005-09.09.2005. 30 s. ISBN: 80-248-0895-1.
5. TMS (The Minerals, Metals & Materials Society): Rapid Prototyping of Materials. The Minerals, Metals & Materials Society. 2002, pp. 615. ISBN 0873395301.

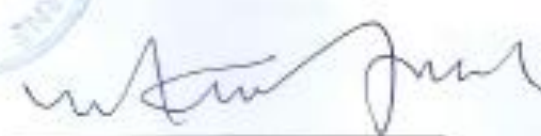
Vedoucí bakalářské práce: Ing. Josef Sedlák, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2011/12.

V Brně, dne 21.11.2011




prof. Ing. Miroslav Piška, CSc.
Ředitel ústavu


prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan

ABSTRAKT

Práce byla vypracována jako bakalářský projekt na FSI VUT v Brně. V teoretické části práce byly popsány metody technologie Reverse Engineering. Dále zde byl objasněn princip aditivní technologie Rapid Prototyping a předvedeny její nejdůležitější metody, u kterých byly shrnuty výhody či nevýhody a možnost využití v technické praxi. V experimentální části práce byly tyto moderní metody aplikovány pro tvorbu odkládacího stojanu na mobilní telefon. Tímto byla ověřena možnost moderních metod pracovat i s tvarově složitými modely. Jako alternativní možnost výroby byla použita technologie odlévání do silikonové formy. Na konci práce byly shrnuty možnosti výroby moderními technologiemi a provedeno technicko-ekonomické zhodnocení.

Klíčová slova

Reverzní Inženýrství, Rapid Prototyping, Digitalizace, Fused Deposition Modeling, Silikonová Forma.

ABSTRACT

The thesis was made as a bachelor's project on Faculty of Mechanical Engineering, Brno University of Technology. In the theoretical part methods of Reverse Engineering were described. The principle of the following technology, the Rapid Prototyping, was also explained and the summary of advantages and disadvantages and use in technical practice for the most important methods was made. In the experimental part of the thesis the modern methods were applied for manufacturing a cell phone holder. By this the possibility of these technologies to work with complexly shaped models was verified. The casting to a silicon form was used as the alternative method of manufacturing. The summary of possibilities of manufacturing with these technologies and technical and economical evaluation were made in the end of the thesis.

Keywords

Reverse Engineering, Rapid Prototyping, Digitizing, Fused Deposition Modeling, Silicone Form.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

TESAŘ, Jaroslav. *Aplikace moderních metod pro výrobu odkládacího stojanu na mobilní telefon*. Brno 2012. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 70 s. 3 přílohy.

Vedoucí práce: Ing. Josef Sedlák, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Aplikace moderních metod pro výrobu odkládacího stojanu na mobilní telefon** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Jaroslav Tesař

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto Ing. Josefu Sedlákoví, Ph.D. za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce. Dále bych rád poděkoval firmě MCAE Systems, s.r.o. za spolupráci při skenování a možnosti použití skeneru ATOS II, zvláště řediteli společnosti panu Ing. Miroslavu Drápalovi. Rád bych také poděkoval panu Ing. Martinu Macků za pomoc při výrobě silikonové formy. V neposlední řadě patří poděkování mým rodičům za umožnění studia na vysoké škole a podporu během studia.

OBSAH

ABSTRAKT	4
PROHLÁŠENÍ.....	6
PODĚKOVÁNÍ	7
OBSAH	8
ÚVOD	10
1 POPIS TECHNOLOGIE REVERZNÍHO INŽENÝRSTVÍ	11
1.1 Oblasti využití a historie reverzního inženýrství	11
1.2 Digitalizace	12
1.3 Nástroje reverzního inženýrství	15
1.4 3D skenery a jejich využití	15
1.5 Obecné rozdělení 3D skenerů	16
1.5.1 Destruktivní skenery	17
1.5.2 Nedestruktivní skenery	17
1.5.3 Dotykové skenery	17
1.5.4 Bezdotykové skenery	18
1.5.4.1 Optické skenery	18
1.5.4.2 Laserové skenery	21
1.5.4.3 Ultrazvukové skenery	22
1.5.4.4 Rentgenové skenery	22
1.5.5 Stacionární zařízení	22
1.5.6 Mobilní zařízení	22
2 POPIS TECHNOLOGIE RAPID PROTOTYPING	23
2.1 Princip technologie Rapid Prototyping	24
2.2 Data pro tvorbu modelu	24
2.3 Zařízení pracující s technologií Rapid Prototyping	24
2.3.1 Domácí 3D tiskárny	26
2.3.2 Profesionální 3D tiskárny	27
2.4 Vývoj a možnosti technologie Rapid Prototyping	27
2.5 Srovnání technologie Rapid Prototyping s konvenčními technologiemi	27
2.6 Dostupné metody Rapid Prototyping	28
2.6.1 Stereolitografie SLA	29
2.6.2 Solid Ground Cutting SGC	31
2.6.3 Selective Laser Sintering SLS	32
2.6.4 Direct Metal Laser Sintering DMLS	34

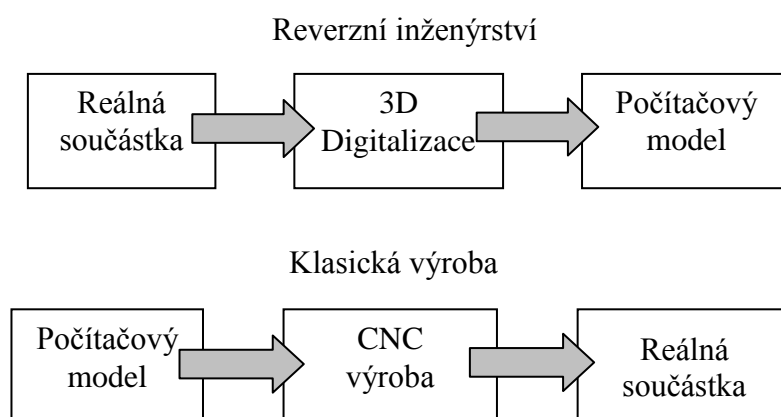
2.6.5 Laminated Object Manufacturing LOM.....	37
2.6.6 Fused Deposition Modeling FDM.....	39
2.6.7 Multi Jet Modelig MJM.....	41
3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	43
3.1 Získání dat modelu	43
3.2 Úprava a zpracování dat	45
3.3 Tisk prototypu.....	46
3.3.1 Příprava digitálního modelu v softwaru CatalystEX.....	47
3.3.2 Tisk prototypu 3D tiskárnou Dimension uPrint	49
3.4 Úprava modelu.....	51
3.5 Výroba silikonové formy	52
3.5.1 Výroba první části formy.....	52
3.5.2 Výroba druhé části formy	54
3.6 Odlití prototypu z pryskyřice.....	55
3.7 Konečná úprava modelu	56
4 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ.....	58
4.1 Výroba prototypu metodou Fused Deposition Modeling	58
4.1.1 Náklady na tisk modelu stojanu na mobilní telefon	58
4.2 Materiálové náklady na výrobu silikonové formy.....	58
4.3 Materiálové náklady na výrobu modelu odlitím.....	59
4.4 Celkové na výrobu modelu odlitím	59
4.5 Porovnání nákladů pro série vyráběné technologií Rapid Prototyping a odléváním...59	
5 DISKUSE.....	62
5.1 Získání dat 3D skenováním	62
5.2 Zhodnocení tvorby modelu technologií Rapid Prototyping	62
5.3 Zhodnocení výroby prototypu odlitím do silikonové formy	62
5.3.1 Návrh úpravy silikonové formy.....	63
ZÁVĚR	64
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	65
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	68
SEZNAM PŘÍLOH.....	70

ÚVOD

Rozvoj techniky a průmyslu je v posledních letech či desetiletích obrovský a je ukazatelem lidské vyspělosti. S každodenním pokrokem techniky rostou i nároky na výrobu a technologie výroby. Pokrok techniky sebou nese i rozvoj různých součástí či sestav, které jsou v mnohém odlišné než dříve. Technologie se dnes musejí vypořádat s mnohem tvarově složitějšími součástmi, musejí uspokojit vysokou poptávku, nároky na přesnost, musí být schopny zpracovat širokou škálu materiálů a to vše v co nejkratším čase. V neposlední řadě je dnes daleko více než dříve kladen důraz na design. Díky těmto aspektům se neustále vyvíjejí nové moderní technologie, které slouží k naplnění požadavků a nároků kladených na vývoj či výrobu. Jedním z oborů moderních technologií je Reverse Engineering. Tato technologie umožňuje získání digitálního modelu z reálné součásti, bez ohledu na její velikost či tvar. Uplatnění nachází zejména při digitalizaci součástí, u kterých není možné vytvoření modelu běžným modelováním v 3D softwaru, aniž by byla dosažena požadovaná přesnost. Navazující technologie na Reverse Engineering je Rapid Prototyping. Technologie Rapid Prototyping slouží zejména k výrobě tvarově složitých prototypů. Součást lze vytvořit z různých materiálů, jako jsou plast, vosk či kov. Využití těchto modelů je např. k porovnání s reálným modelem, měření přesnosti, ověřování funkčnosti součásti nebo vizualizaci. Je zde prostor i k designovým úpravám či změnám konstrukce součásti. Tvorba modelu probíhá po vrstvách a je možné vytvářet složité modely, součást s kanálky či dokonce duté součásti. Technologie Rapid Prototyping má oproti jiným technologiím několik výhod. Jedna z hlavních výhod je rychlé vytvoření modelu, což představuje velice důležité kritérium při volbě způsobu tvorby prototypu. Další výhodou je téměř bezezbytkové využití materiálu, což představuje značné úspory především v porovnání s technologií obrábění. Technologie Rapid Prototyping je velice variabilní technologie, je možné vytvářet jakékoliv tvarové součásti bez provedení zásadních změn ve výrobním zařízení. Při tvorbě prototypu není nutné pořizovat drahé formy, jako např. u kování. Technologie nevyžaduje nakupování a výměnu složitých a drahých nástrojů, jako např. u obrábění. Všechny tyto výhody vedou k ekonomické a časové úspoře, která je hlavní výhodou této technologie a dává jí perspektivu pro rozvoj a využití v budoucnosti. Obě moderní technologie byly v práci popsány a aplikovány při výrobě zvolené součásti. Technologie Rapid Prototyping byla doplněna o alternativní technologii odlévání do silikonové formy a výsledky byly uvedeny v technicko-ekonomickém zhodnocení.

1 POPIS TECHNOLOGIE REVERZNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Reverzní inženýrství (RI) je metoda používaná zejména pro vytváření modelů ze stávajících součástí, které mají složitý tvar. Využívána je také u modelů, u nichž nejsou k dispozici výrobní výkresy či byly vytvořeny bez technické dokumentace. Vytvoření 3D modelů těchto dílů v modelářských 3D programech by bylo velmi komplikované a zdlouhavé, přičemž přesnost vytvořených prvků by byla nedostačující. Proto rychlé a přesné získávání modelu 3D skenováním proniká stále hlouběji do praxe. Technologie digitalizace modelu se stává stále dostupnější, díky tomu je stále častěji využívána mnoha obory. Jde o moderní technologii, která se vyznačuje opačným sledem činností Obr. 1.1. V běžné praxi je nejprve vytvořen 3D model, který slouží k následné výrobě reálné součásti nejrozličnějšími technologiemi. V RI jde o opačný postup. Na počátku procesu je reálný model, který je digitalizací převeden za pomoci softwaru pro zpracování dat na virtuální 3D model, se kterým lze dále pracovat [1,2,6,7].

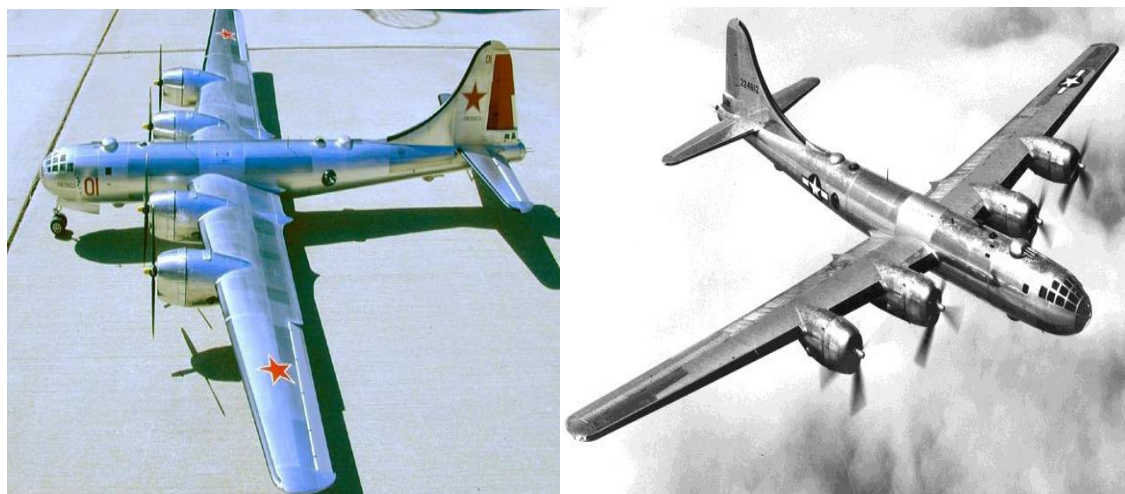


Obr. 1.1 Proces reverzního inženýrství a klasické výroby [1].

1.1 Oblasti využití a historie reverzního inženýrství

RI slouží k získání 3D modelu, který je dále používán k dalšímu zpracování. Jde především o vytvoření digitální verze objektu, který slouží k porovnávání, upravování či k následné výrobě. Např. v architektuře začalo sloužit RI k získání digitální podoby objektů či staveb. V archeologii slouží k získávání a uchování 3D modelů vzácných předmětů. Data takto získána bývají následně upravována, archivována a mohou sloužit jako 3D vizualizace. Virtuální modely mohou být dále zpracovány a připraveny k výrobě kopií. 3D digitalizace předmětů našla široké uplatnění také ve filmářském průmyslu. Využití v této oblasti slouží např. k digitalizaci budov, zařízení nebo osob. Takto získaná data jsou upravena a použita k vizualizaci nebo úpravě v nejrozličnějších filmářských programech. Podobné uplatnění našlo reverzní inženýrství v reklamě či tvorbě počítačových her. Využití RI je široké zejména v oblasti zbrojního průmyslu, strojírenství či dokonce průmyslové špionáže. Úkolem bývá vyrobění shodných předmětů se stejnými vlastnostmi. RI může být posuzováno v krajních situacích jako průmyslová špionáž či porušení duševního vlastnictví [1,2,7,8,9].

Historie RI, jakožto zpětného kopírování objektů, sahá již k počátkům moderní historie. Ovšem RI jak jej známe dnes, se začalo plně využívat kolem roku 1990. Touto dobou se začaly vlivem vysoké poptávky a zejména díky technickým možnostem vyvíjet metody RI až do podoby, jak je známe dnes. Využití RI nacházelo zejména ve strojírenství a technických oborech. Hojně bylo RI využíváno zejména ve zbrojním průmyslu. Kopírování jednotlivých technologických zařízení či komponent, které byly získávány různými cestami od konkurenčních či nepřátelských států, vedlo k vytváření podobných či identických celků. Tyto praktiky byly hojně využívány již za druhé světové války či za studené války. Jako názorný příklad lze uvést bombardér B29 vyvinutý americkou armádou a ruský bombardér Tu-4 Obr 1.2. Tyto dva stroje byly v podstatě kopie [2,7,8,9].



Obr. 1.2 Vlevo americký bombardér B-29, vpravo ruský bombardér Tu-4 [9].

1.2 Digitalizace

Při digitalizaci dochází ke snímání jednotlivých bodů na objektu. Získané souřadnice vytvoří celek nazývaný jako mrak bodů. Pro navazující proces modelování je nutno data upravit na plošné nebo objemové tělo. Data v této podobě lze použít k dalšímu zpracování (např. k vytvoření CNC programu, k vytvoření technické dokumentace či vytvoření formy) [1,2,11,12].

Proces digitalizace se skládá z těchto bodů:

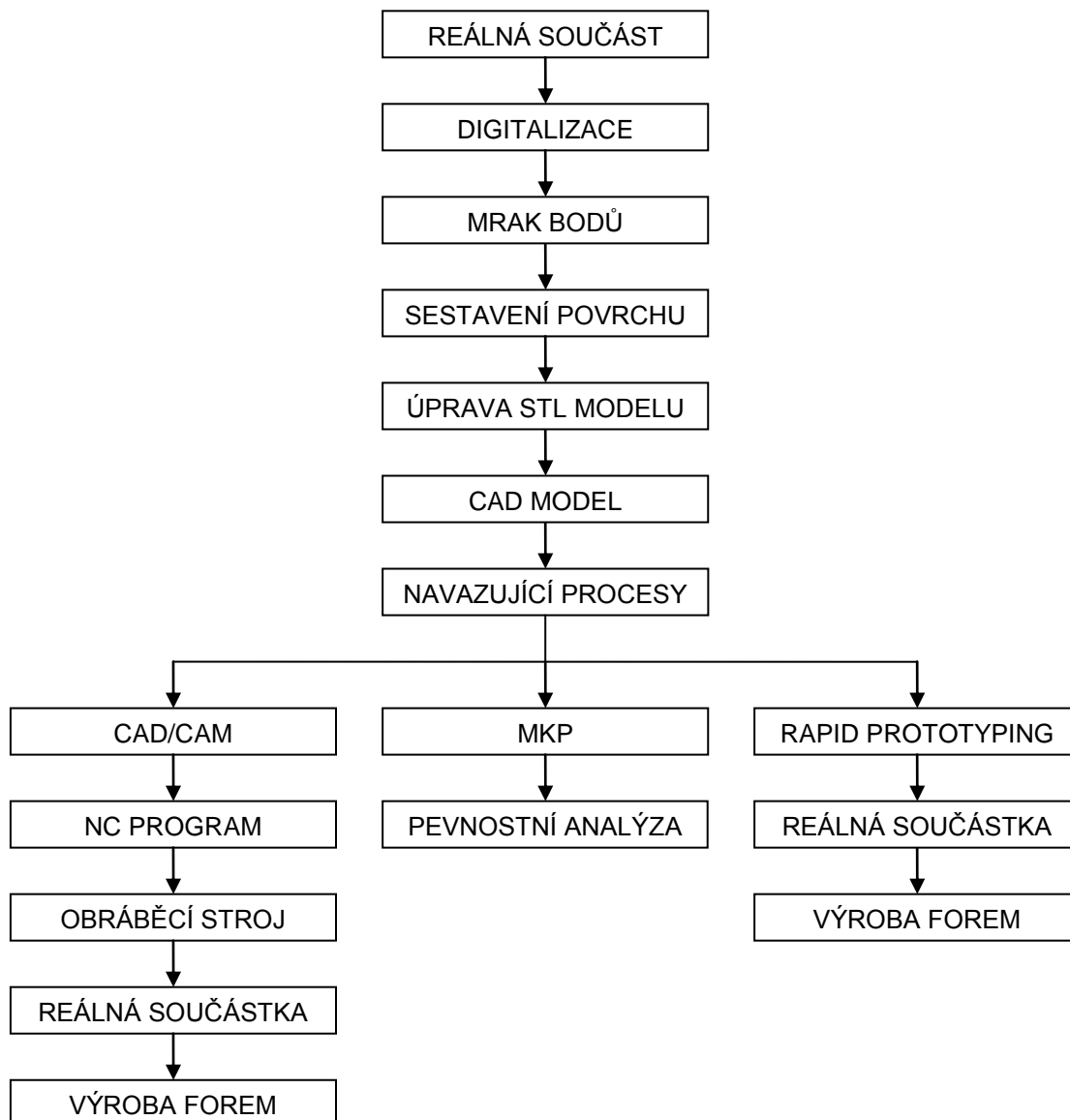
- nasnímání prostorových souřadnic;
- úprava naskenovaných dat;
- vytvoření CAD dat;
- využití dat v post-processingu [1,2].

Proces digitalizace je prováděn pomocí digitizérů (skenerů), které jsou podrobněji popsány v další kapitole. Práce těchto zařízení je založena na různých principech, které určují způsob provedení samotné digitalizace [1].

Způsob digitalizace ovlivňuje řada faktorů:

- velikost digitalizovaného objektu;
- požadavky na kvalitu dat;
- použití digitalizace [1].

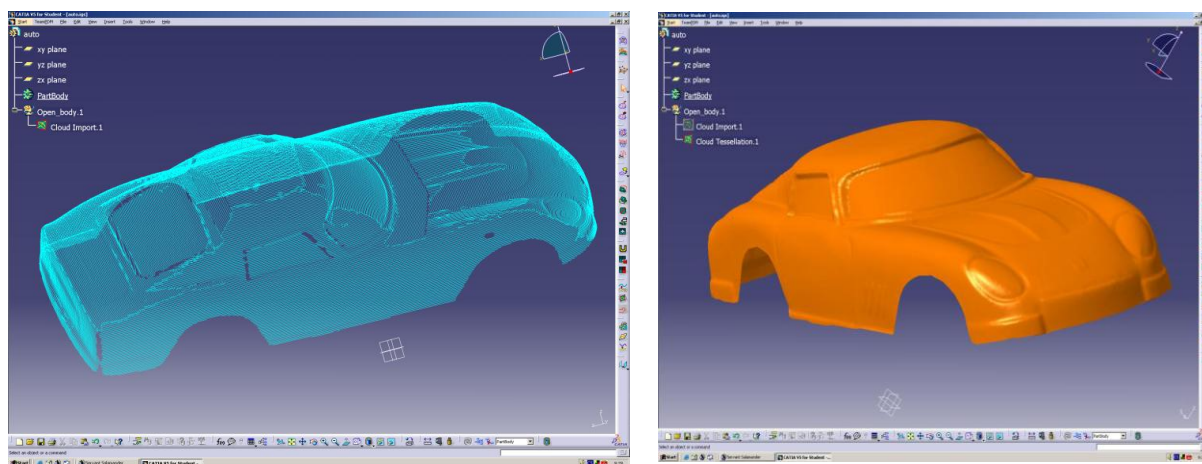
Získaná data lze upravovat a využívat v navazujících procesech Obr. 1.3.



Obr. 1.3 Vývoj a proces vzniku reálné součásti [10].

K úpravě dat slouží speciální programy pro práci s mrakem bodů a modifikaci obecných ploch. Jako vstupní formát dat je nejčastěji používán formát *.stl. Formát *.stl tvoří dvourozměrné entity, sloužící k nadefinování křivek. Z těchto hraničních křivek lze následně vytvořit plochu, která bude aproximovat daný mrak bodů Obr 1.4. Software umožňuje zvolit

vhodný řád plochy tak, aby aproximace bodů byla co nejpřesnější a nejrealističtější. Jestliže jsou provedeny všechny operace, které vytvářejí plochy z naskenovaného mraku bodů, následuje export dat do některého z výstupních formátů (*.iges, *.vda, *.step, *.stl, *.dxf). Tyto formáty jsou běžně podporované většinou CAD aplikací. K procesu zpracování dat lze použít např. softwaru Surfacar či CATIA V5-modul Digitized Shape Editor. Upravenou součást lze poté použít jako 3D model vytvořený v klasických modelovacích programech a načíst jej do běžného 3D CAD softwaru. Takto vytvořená součást ovšem nemá historii vzniku. S modelem je nadále možno pracovat jako s běžným 3D modelem a vytvářet výkresovou dokumentaci nebo provést např. úpravy rozměrů, změny tvarů, pevnostní či dynamické analýzy, začlenění do již existující sestavy či model použít v CAM technologiích pro získání NC programu [1,2,11,12,13].



Obr. 1.4 Vlevo jsou znázorněna data získaná skenováním, vpravo vyhlazený model [13].

Metody digitalizace lze rozdělit také do dvou skupin.

- 2D digitalizace;
- 3D digitalizace.

2D digitalizace

Výsledkem je přímo použitelný formát jako např. fotografie součásti, případně technická dokumentace. Možnosti následného využití jsou úprava pro animaci, schémata či vytvoření prezentace. 2D digitalizací lze též získat 3D model pomocí speciálních softwarů.

3D digitalizace

Výsledkem je soubor dat v prostoru, jak již bylo popsáno dříve. Tímto postupem je získána tzv. „mrtvá geometrie“. Tento model je dostačující v případě pouhého měření. Jestliže je však požadováno, aby byl model dále využitelný pro úpravu či design, je nutno použít další postupy. Následný postup úpravy modelu umožní jeho širší využití a možnost zpracování [1,2,11].

1.3 Nástroje reverzního inženýrství

Hardwarové nástroje tvoří:

Digitizér (skener) - umožňuje digitalizaci objektu.

Ve většině případů obsahuje:

- senzorovou jednotku - sloužící ke snímání geometrie objektu;
- výpočetní jednotku - systém sloužící ke shromažďování, vyhodnocování a vizualizaci dat;
- příslušenství zařízení - upevňovací systémy, pohyblivé či statické stojany, robotická ramena a stativy.

Počítač s vybavením - slouží zejména k zobrazování průběžného výsledku snímání. Je vybaven příslušným softwarem, který umožňuje práci s digitalizovaným modelem.

Ostatní pomůcky pro digitalizaci - referenční body, kalibrační desky a tyče, pomůcky pro úpravu modelu jako jsou např. práškové spreje [1,2].

Softwarové nástroje slouží zejména k:

- práci s daty při procesu digitalizace;
- kontrole kvality dat, tvaru, důležitých rozměrů a bodů;
- další práci s modelem jako jsou např. simulace, modelování, úprava, vizualizace [1].

1.4 3D skenery a jejich využití

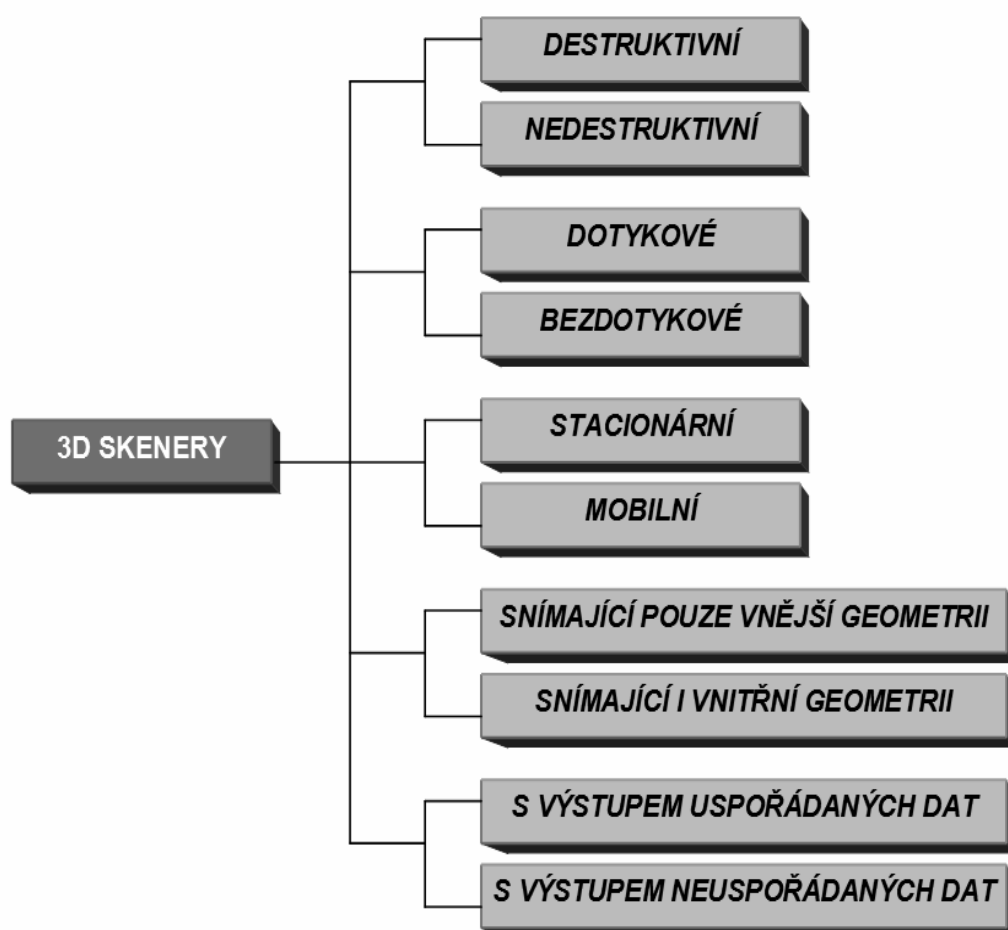
3D skenery umožňují jednoduchý, přitom velice rychlý a přesný přenos prostorových tvarů do virtuálního 3D modelu. 3D skenery shromažďují data a údaje o tvaru součástí pomocí nejrozličnějších technologií. Nejčastěji se používají nedestruktivní skenery využívající rentgenového záření, ultrazvuku, laseru, optiky a mechanické dotekové skenery. Informace shromážděné skenerem slouží následně pro tvorbu 3D modelu. 3D skenery jsou hojně využívány v mnoha oborech lidské činnosti. Jednotlivé typy skenerů využívají vědci, lékaři, technici, tvůrci počítačových her či filmů i obory jako jsou např. archeologie nebo muzeologie. Jedním z hlavních uživatelů 3D skenerů je však automobilový průmysl Obr. 1.5 [1,2,14,15,25].



Obr. 1.5 Měření karoserie osobního automobilu [25].

1.5 Obecné rozdělení 3D skenerů

V technické praxi se postupem času vyvinulo několik druhů 3D skenerů Obr. 1.6. Mezi základní rozdělení patří vztah k modelu. Tento vztah udává, zda je model během skenování poškozen či nikoli. Důležitou vlastností je mobilita zařízení, zvláště u rozměrných předmětů, které nelze přepravovat. Dalším velice důležitým kritériem je uváděna přesnost 3D skeneru. Přesnost je dána technologií používanou 3D skenerem, velikostí součásti a její členitostí. Velký vliv na přesnost skenování a kvalitu dat mají zkušenosti obsluhy a strategie skenování, zvláště u velkých tvarových předmětů. Další aspekty jsou rychlost snímání, možnost snímat pohyblivé předměty či barevné snímání. Všechny tyto aspekty se ovšem promítají do ceny 3D skenerů, která se pohybuje v řádech statisíců až několika milionů korun. Záleží však na požadavcích kladených na 3D skener, zejména pak na přesnost, kvalitu dat a možnost využívání v jednotlivých oblastech [1,2,14,15].



Obr. 1.6 Rozdělení skenerů [16].

1.5.1 Destruktivní skenery

U destruktivních 3D skenerů dochází k úplnému zničení skenovaného objektu. Destruktivní skenery jsou využívány zejména pro získání modelu se složitou vnitřní strukturou, jako jsou kanálky či dutiny. Princip je založen na postupném odfrézování malých vrstev modelu. Odfrézované vrstvy se pohybují v desetinách či setinách milimetru. Plochy jsou následně skenovány optickým skenerem a data odeslána do příslušného softwaru, který data přijme a automaticky zpracuje. Tímto vzniká množství naskenovaných hladin, které jsou následně převedeny na 3D model. Přesnost digitalizace se pohybuje v řádech setin milimetru. Doba skenování trvá i několik hodin, vzhledem k velikosti součásti, množství skenovaných hladin a jejich rozlišení. Jako příklad lze uvést skenování termitiště v Africe za účelem získání kompletního 3D modelu termitiště Obr. 1.7. Následné zkoumání systému chodeb a principu odvětrávání termitiště by mohlo být využito v praxi [1,2,14,15].



Obr. 1.7 Vlevo skenovací konstrukce, vpravo konečný model termitiště [17].

1.5.2 Nedestruktivní skenery

Nejen v technické praxi, ale i v jiných oborech jako např. architektura, archeologie či medicína jsou hojně využívány nedestruktivní druhy skenerů. Ve většině případů není umožněno zničení nebo jakékoli poškození skenovaného modelu. Proto se ve velké většině případů využívá nedestruktivních 3D skenerů. Nedestruktivní 3D skenery součást nezničí a povrchově či vnitřně nepoškodí.

Princip skenování u těchto typů skenerů je možno rozdělit na:

- dotykové (kontaktní) skenování;
- bezdotykové (nekontaktní) skenování [1,2,14,15].

1.5.3 Dotykové skenery

Dotykové snímání bodů je založeno na dotyku s povrchem skenovaného objektu. U tohoto typu skenování je důležitá jak příprava skeneru, tak i skenovaného objektu. Již před samotným skenováním je většinou nutno vyznačit síť snímacích bodů na tělese. Přesnost skenování závisí jak na přesnosti samotného zařízení, tak i na množství a poloze měřicích bodů. Dotykové skenery umožňují sice přesné měření modelů, ale relativně pomalé vůči ostatním typům skenerů. Tímto postupem je získáno málo přesných bodů za daný čas. Měření je prováděno ve většině případů pomocí měřicích ramen. Pro zefektivnění lze použít zařízení,

kteří je konstrukčně podobné principu CNC frézky s inverzním tokem dat. Místo nástroje je ve stroji upnuta sonda, která je v kontaktu se snímanou plochou. Sonda snímá prostorová data, která jsou následně posílána přes přídruženou elektroniku do systému. Jde o podstatně zefektivnění získávání dat vůči ručnímu měřicímu ramenu. Na Obr. 1.8 jsou zobrazeny ruční dotykový skener Microscribe a produktivní dvouramenný měřicí přístroj Dimension [1,14,15,20].



Obr. 1.8 Vlevo dotykový skener Microscribe, vpravo sloupový dvouramenný měřicí skener Dimension [20, 21].

1.5.4 Bezdotykové skenery

Bezdotykové skenery mají několik velkých výhod. Jsou rychlé, přesné, uživatelsky nenáročné a většinou i přenosné. Největší výhodou je však bezkontaktní snímání ploch. Tato schopnost zajišťuje nekontaktní snímání skenovaného objektu, který může být vzdálen od několika centimetrů až po několik metrů. Při takto provedeném snímání nedojde k poškození snímané plochy ani měřicího přístroje [1,2].

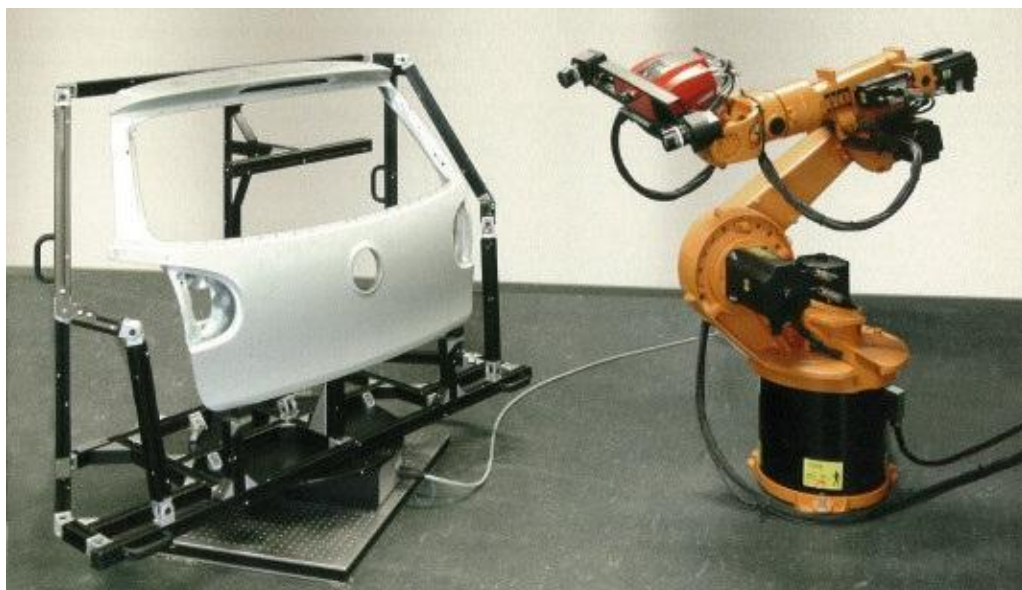
1.5.4.1 Optické skenery

Princip optických skenerů spočívá v naskenování objektu z několika úhlů pomocí optického záření. Jde o bezdotykovou metodu, při které neprobíhá žádný kontakt mezi skenerem a objektem. Snímání je prováděno ručně nebo pomocí polohovacího zařízení. Objekt je nasnímán z několika pozic a data se následně přenášejí do počítače. Po získání dostatečného počtu snímků ze všech úhlů pohledu se data zpracují a digitalizují. Použitím vhodného softwaru se z těchto dat metodou aproximace stává reálný 3D model. Před samotným skenováním je nutno objekt označit několika měřicími body pro přesnější sestavení snímků v 3D prostoru. K označení se většinou používají tzv. měřicí (centrovací) body, které se umístí na skenovaný předmět. Jejich počet je dán velikostí a složitostí skenovaného objektu a pohybuje se od několika desítek po několik set u velkých objektů. Optický skener slouží ke klasickému snímání 3D objektů, lze jej využít také k měření součástí, zejména tvarových ploch. Mezi hlavní výhodu patří mobilita zařízení. Většina optických skenerů má poměrně malou hmotnost a velikost, což umožňuje výbornou manipulaci se zařízením. Jako další výhodu lze uvést flexibilitu zařízení. Optickými skenery lze snímat jak součásti komplikovaných tvarů, tak i součásti různých velikostí od několika milimetrů až po objekty

měřící i několik metrů. Optické skenery dosahují vysokého rozlišení a přesnosti. Komplikace pro optické snímání představují předměty s lesklým povrchem nebo průhledné objekty. Metoda jak tyto povrchy snímat spočívá v nanesení vrstvy křídového spreje, který zajistí lepší odraz fotonů [1,14,15,22,23].

Optický skener ATOS

ATOS je vyráběn firmou GOM a jeho snímání je založeno na principu triangulace. Využívá stereo-efektu dvou snímaných kamer. Snímaný objekt je upevněn do držáku, případně položen na podložku. V případě nutnosti je objekt upraven nanesením neprůhledného povlaku či připevněním centrovacích bodů. Skener následně provede sérii snímků z různých pohledů. K osvětlení projektu slouží projektor s vestavěným rastrem, který promítá na povrch světelné proužky. Tvar světelných proužků na povrchu je snímán dvěma kamerami. Model je sestaven výpočtem z 3D souřadnic bodů pomocí zobrazovacích rovnic. Skener může poskytnout až 4 miliony bodů v jednom záběru. Generace ATOS se odlišují dle velikosti, rozlišení a technické projekce. Skenery ATOS jsou obvykle připevněny na statický stojan, kdy snímky získáváme pohybem skenovaného objektu. Další variantou je připevnění skeneru na pohyblivé rameno a objekt je ve statické poloze. Snímky tedy získáváme natáčením ramene se skenerem kolem snímaného objektu Obr. 1.9 [1,14,15,22,23,24].



Obr. 1.9 Optický skener ATOS připevněný na pohyblivém ramenu [23].

Optický systém TRITOP

TRITOP je optický měřicí systém používaný zejména k měření polohy bodů, kontrastních čar či viditelných značek na objektu. Jde o bezkontaktní snímání a díky svým rozměrům jde o přenosné zařízení Obr. 1.10. Díky této vlastnosti lze provádět i měření rozměrných objektů Obr. 1.11. Samotné snímání a měření je založeno na principu fotogrammetrie. Měřený objekt je nutno označit optickými body nebo optickými terčíky. Snímky jsou pořizovány digitálním fotoaparátem z různých pozic. Na základě těchto snímků systém TRITOP vypočte souřadnice měřených bodů na modelu. Systém dále zobrazí tyto body na měřeném 3D modelu a umožní určit přesnost provedeného měření [25].

Oblasti využití dat:

- kontrola kvality;
- reverzní inženýrství;
- deformační analýza;
- spolupráce se systémem ATOS [25].



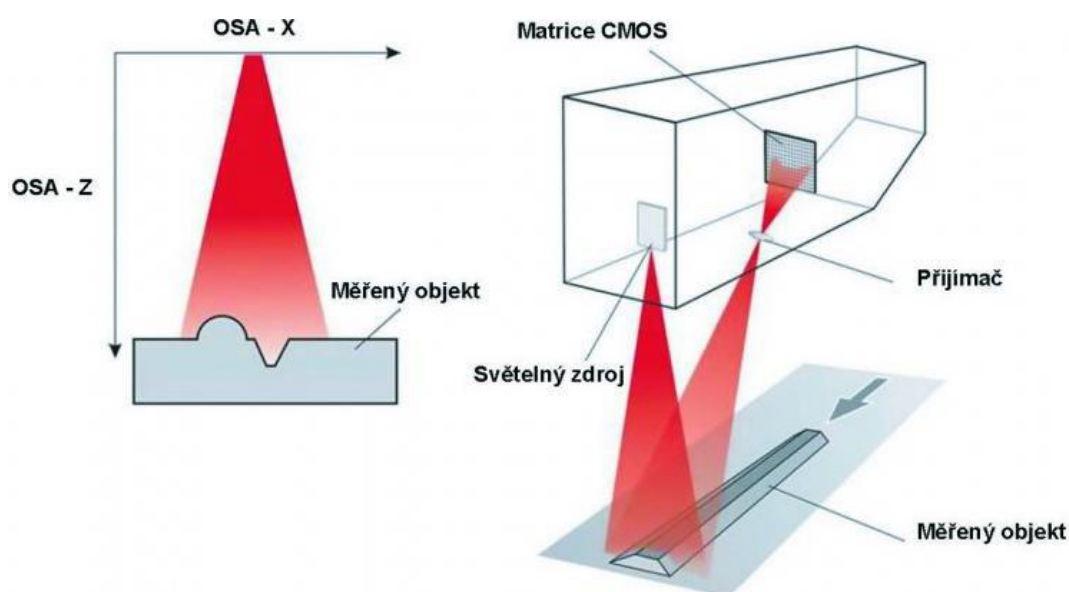
Obr. 1.10 Kompletní systém TRITOP [25].



Obr. 1.11 Měření velkých objektů systémem TRITOP [25].

1.5.4.2 Laserové skenery

Princip práce laserového skeneru lze přirovnat k sonaru. Laserový skener pracuje na principu vyslání laserového paprsku kolmo na objekt. Tento paprsek se následně odrazí a vrátí se zpět do zařízení Obr. 1.12. V zařízení jsou tyto informace dále vyhodnocovány. Vyhodnocení probíhá na základě doby, která uplyne od vyslání paprsku a vrácení odraženého paprsku nazpět. Vyhodnocením těchto dat je získána informace o rozměru skenovaného objektu ve směru letu paprsku. Z úhlu, pod kterým se paprsek odrazí zpět do zařízení, je získána informace o zakřivení povrchu objektu. Skener může mít jednu nebo i více skenovacích rovin [14,15,26].



Obr. 1.12 Princip práce laserové skenovací hlavy [26].

Spojením těchto informací je získána poloha bodu. Skener se může pohybovat okolo statického objektu a snímat jeho povrch Obr. 1.13. V opačném případě je skener ve statické poloze a objekt se otáčí pomocí speciálních otočných stolů. Kvalita digitalizace je dána hustotou laserového paprsku, který pokrývá povrch tělesa. Výsledkem je přesný digitální 3D model snímaného objektu [14,15,27].



Obr. 1.13 Princip práce laserové skenovací hlavy [27].

1.5.4.3 Ultrazvukové skenery

Ultrazvukové skenování objektu je prováděno pomocí ultrazvukové sondy. Jde o jedno z nejlevnějších řešení prostorového snímání. Při skenování je využita skenovací ultrazvuková sonda, která má tvar pistole s kovovým hrotem. Průběh skenování probíhá přiložením skeneru ke skenovanému povrchu a následnému vyslání ultrazvukového signálu. Tento signál je ultrazvukovými čidly dekodován a následně jsou získány prostorové souřadnice. Tyto souřadnice je možno vkládat do CAD systémů nebo datových souborů. Přesnost u ultrazvukového skeneru se pohybuje pouze v desetinách milimetru, což je velká nevýhoda tohoto zařízení. Využití je zejména v oblastech, ve kterých není kladen důraz na přesnost získaných dat. Jde především o filmářský průmysl, reklamní průmysl a v neposlední řadě se využívají ultrazvukové skenery ve zdravotnictví [14].

1.5.4.4 Rentgenové skenery

Velkou výhodou rentgenového skeneru je možnost získání informací o vnitřní geometrii součásti bez jeho porušení. Jde tedy o nedestructivní metodu digitalizace. Skenery pracují s rentgenovým zářením jako klasické rentgeny používané ve zdravotnictví. Intenzita záření je v tomto případě vyšší. Využití nachází rentgenové skenery v technické praxi u součástí se složitými vnitřními částmi, jako jsou drážky či kanálky. Rentgenové skenery lze dále použít ke kontrole kotlů, potrubí či jiných uzavřených nebo nepřístupných nádob [14].

1.5.5 Stacionární zařízení

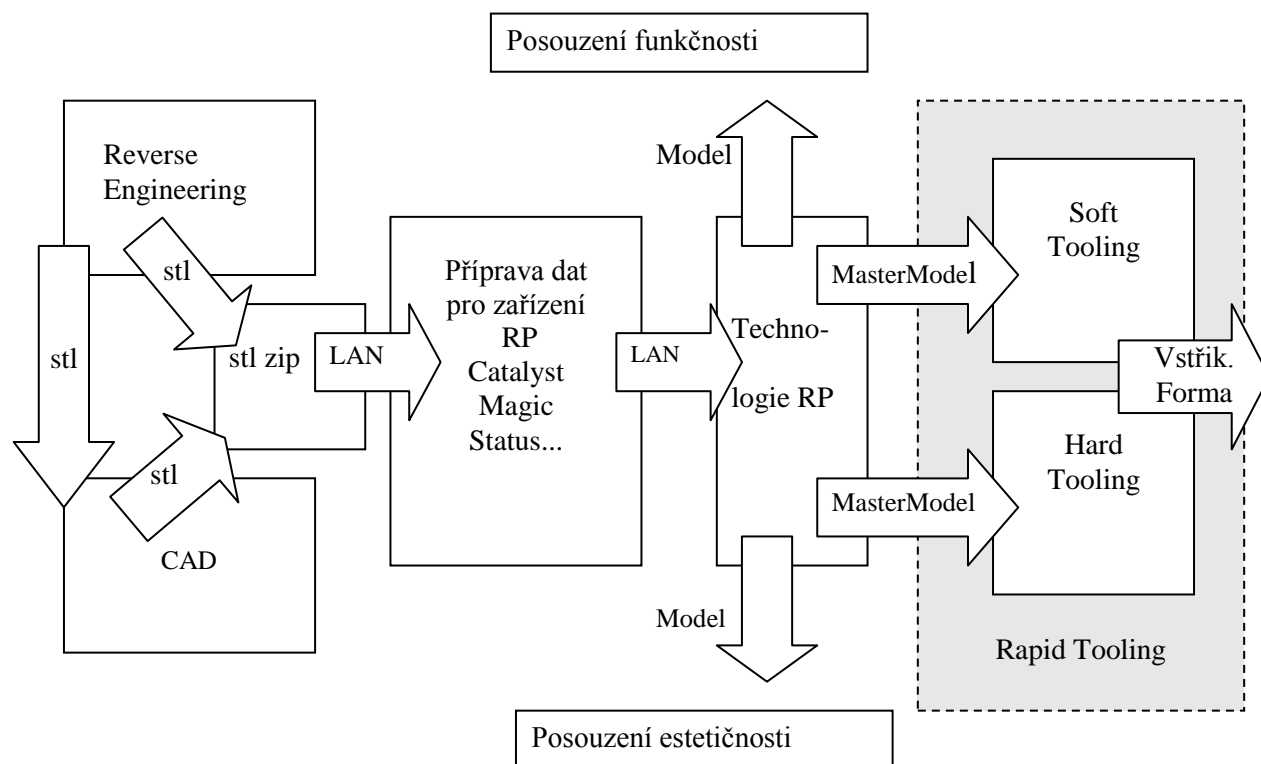
Jde o zařízení, které je limitováno svou velikostí, nastavením či složitostí manipulace. Taková zařízení nelze přemísťovat za účelem skenování jednotlivých předmětů. Skenované objekty je tedy nutno dopravit do prostor vybavených skenovacími zařízeními [1,2].

1.5.6 Mobilní zařízení

Mobilní skenovací zařízení jsou většinou skenery, u kterých je díky své velikosti umožněna manipulace. Jde o velice častý požadavek zákazníků, kteří vyžadují mobilitu skenerů. Mnohdy jsou skenovány objekty, které by nebylo možné dopravit do prostor vybavených stacionárními skenery, z důvodu jejich velikosti či nemožnosti manipulace. Mobilita je obrovskou výhodou, díky které se mobilní skenery stávají stále častěji vyhledávanými [1,2].

2 POPIS TECHNOLOGIE RAPID PROTOTYPING

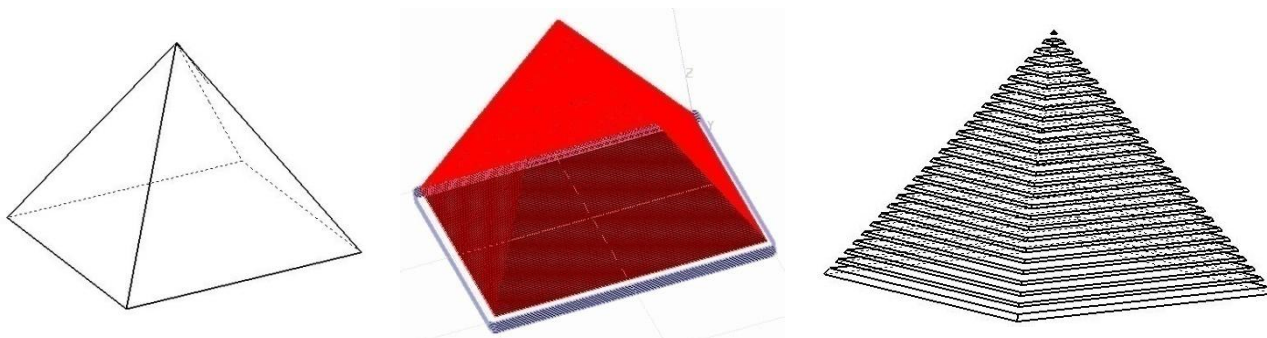
Rapid Prototyping (RP) je jednou z nových technologií, navazující na reverzní inženýrství. Technologie RP umožňuje stavbu reálných prostorových prototypů z virtuálních 3D modelů. Vytvoření reálného prototypu probíhá daleko rychleji než u běžných technologií, což je jedna z hlavních výhod této technologie. Výroba prototypu jinými technologiemi, jako jsou např. odlévání, CNC obrábění či kování, trvá mnohdy dny až týdny. Důvodem je vytváření forem nebo psaní složitých CNC programů. Doba potřebná k vytvoření reálné součásti technologií RP z virtuálního modelu se pohybuje v řádech hodin, záleží ovšem na velikosti součásti. Tato výhoda přináší značnou úsporu času, tudíž i prostředků vynaložených na výrobu. Technologie RP umožňuje stavbu komplikovaných součástí i za dodržení požadavků kladených na přesnost a pevnost vytvářeného dílu. Technologie RP dnes již neslouží pouze pro vývoj nových komponentů, ale nachází uplatnění také ve spotřebním průmyslu a zdravotnictví. Se součástmi zhotovenými jednou z metod RP je možno dále pracovat v oblasti testování, měření, porovnávání nebo je možná pouze vizualizace modelu. S technologií RP jsou však provázány také další navazující technologie Obr. 2.1. Nejpoužívanější navazující metody RP jsou CNC obrábění a slévárství (Soft Tooling, Hard Tooling). Při vytváření součástí je používán 3D model získaný technologií reverzního inženýrství nebo model vytvořený v běžných 3D modelářských programech. Odpadá tedy veškerá práce spojená s tvorbou technické dokumentace. RP je poměrně nová technologie, která je plně využívána přibližně 15 let. Stačila si ovšem získat pozici výrobní metody hojně využívané při tvorbě jak prototypů, tak výrobků v různých oblastech použití [1,2,3,4,5].



Obr. 2.1 Etapy rychlé výroby prototypů [10].

2.1 Princip technologie Rapid Prototyping

Princip vytváření modelu technologií RP je opakované nanášení materiálu na model. Materiál je nanášen po malých vrstvách, které mají konstantní tloušťku Obr. 2.2. Tato metoda se nazývá aditivní. Jde tedy o metodu odlišnou od běžného CNC obrábění, kdy se materiál naopak odebírá z polotovaru ve formě třísek, čímž vzniká výrobek (metoda subtraktivní). Z tohoto pohledu je využití materiálu u technologie RP daleko vyšší než u běžného třískového obrábění. Součást lze vytvořit z mnoha druhů materiálů. Primárně se však využívají materiály jako např. pryskyřice, termoplast, vosk a kovové prášky. Různorodost materiálů společně s rychlostí vytváření součásti dělá z technologie RP stále častěji využívanou a konkurenceschopnou metodu tvorby modelů [1,2,3,4].



Tvar vyrobené součásti.

Tvary jednotlivých vrstev
vypočítané softwarem.

Proces tvorby součásti, schéma.

Obr. 2.2 Obecný princip technologie RP [1].

2.2 Data pro tvorbu modelu

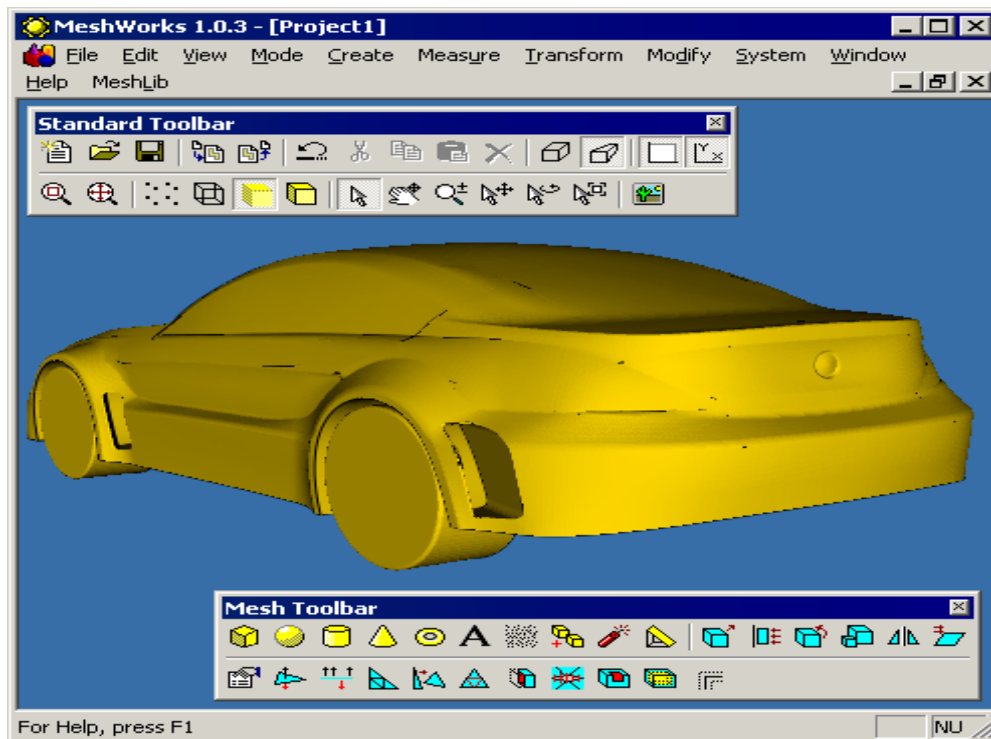
První zdroj dat je reálná součást. Nejvíce využívaná metoda je získání dat pomocí optických či laserových 3D skenerů. Lze využít i dotykových skenerů, ale tato metoda není z důvodu efektivity těchto skenerů využívána. Výstupem je tzv. mrak bodů, který je pomocí softwaru převeden na trojúhelníkovou síť polygonů. Nutné je provést následné vyhlazení povrchu. Tento proces úpravy dat je však složitý a vzniká při něm mnoho problémů [1,2].

Praktické problémy při získávání a úpravě dat:

- kalibrace;
- přesnost;
- neúplná data;
- více zobrazení;
- konečná úprava povrchu [1,2].

Získaná a upravená data vytvoří model ze sítě polygonů, který může být uložen v libovolném formátu. Model lze následně použít k dalšímu zpracování odpovídajícím programem. Druhým zdrojem dat je virtuální model vytvořený v libovolném CAD systému. Jde především o systémy Inventor, CATIA, Pro/Engineer, SolidWorks. Model lze vytvořit jak nástroji objemového, tak i plošného modeláře. Při tvorbě modelu musíme dbát na uzavření povrchu.

Vytvořený model je exportován systémem ve výměnném formátu dat. Nejčastěji používaný formát pro export je formát *.stl, ale je možno využít i jiné formáty jako např. *.iges a další. Převod dat modelu na formát *.stl spočívá v nahrazení modelu prezentací povrchu pomocí ploch. Jedním z nástrojů pro práci s *.stl modelem je program MeshWorks Obr. 2.3, ve kterém můžeme model nejen prohlížet, ale i modifikovat. Je však doporučeno provádět změny přímo ve zdrojovém modelu, abychom předešli komplikacím [1,2,28].



Obr. 2.3 Práce s *.stl modelem v programu MeshWorks [28].

Třetím zdrojem dat pro technologii RP je využití libovolného CNC řídicího programu. Nejznámější takto využívané systémy jsou Sinumeric nebo Heidenheim. Jde ale o nejméně využívaný zdroj dat [1,2,30,28].

Data jsou zpracovávána a připravována k tisku v programech, které jsou ve většině případů součástí jednotlivých tiskáren. Tyto obslužné softwary jsou nainstalovány v počítači, který je propojen s tiskárnou. Odtud jsou přenesená data zasílána přímo do tiskárny. Tyto řídicí počítače mohou být od tiskárny vzdáleny a lze je tedy ovládat a kontrolovat i přes dálkové připojení. Funkce programu pro přípravu dat:

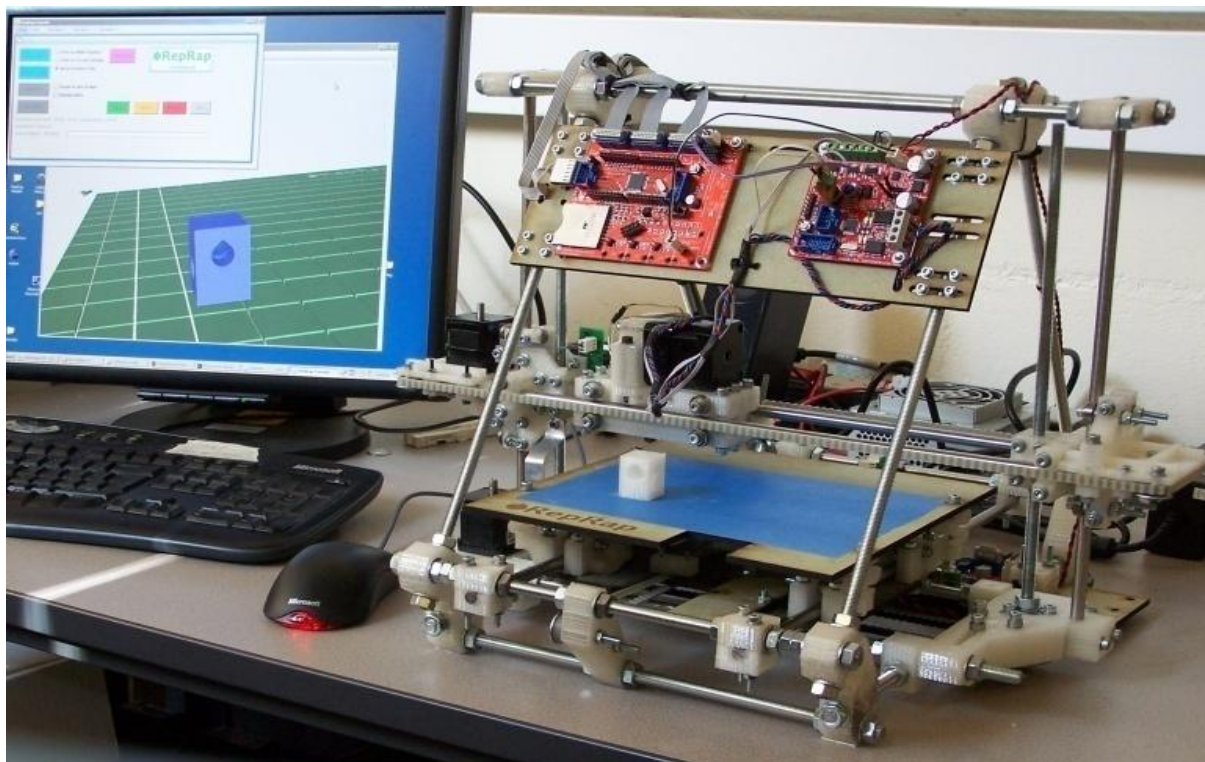
- načtení a kontrola formátu dat *.stl;
- nastavení měřítka tisku modelu;
- nastavení tloušťky vrstvy;
- definováním polohy modelu v komoře tiskárny;
- generování řezů a pohybu tiskového nástroje [2,4].

2.3 Zařízení pracující s technologií Rapid Prototyping

Zařízení využívajících technologii RP je v dnešní době celá řada. Za poslední dvě desetiletí se tato technologie poměrně rozšířila nejen do oblasti výzkumu a vývoje, ale i do průmyslové výroby prototypů [1,2].

2.3.1 Domácí 3D tiskárny

Domácí 3D tiskárny jsou dnes již poměrně dostupné a jejich výrobou a prodejem se zabývá několik firem. Další možností získání 3D tiskárny je sestavení zařízení po zakoupení příslušných komponentů. Konstrukce této tiskárny je poměrně jednoduchá a existuje mnoho konstrukčních variant. K sestavení jsou však nutné dlouhodobé zkušenosti se sestavením a seřizením těchto tiskáren. Výhodou jsou však náklady na tvorbu modelu, která je levnější než u běžně prodávaných zařízení. U této tiskárny je možná i sebereplikace. Tiskárna je schopna vyrobit podstatnou část součástí použitých k tvorbě další tiskárny. Nevýhodou tohoto druhu tiskáren je poměrně malá přesnost a nízká kvalita tisku. Dobrým seřizením a vhodnou konstrukcí můžeme tyto vlastnosti výrazně ovlivnit, ale dosažení úrovně tisku srovnatelného s běžnými tiskárnami je problematické. Využití domácí 3D tiskárny nacházejí u výroby menších a jednodušších předmětů, u kterých nejsou kladeny velké požadavky na přesnost. Ceny těchto tiskáren se pohybují kolem 20 tisíc korun, což ve srovnání s profesionálními 3D tiskárnami, které se mohou pohybovat i v řádech milionů korun, přijatelná alternativa. Cena dělá z domácích 3D tiskáren dostupné zařízení pro tvorbu nejrůznějších komponentů a modelů. Jedny z nejrozšířenějších modelů domácích tiskáren jsou typy Darwin a Mendel Obr. 2.4, Tab. 2.1 [29].



Obr. 2.4 Domácí 3D tiskárna Mendel [29].

Tab. 2.1 Technické parametry 3D tiskárny Mendel [29].

Technologie tisku	Výroba tavením vláken / Termoplastické vytlačování
Oblast tisku	200 mm délka x 200 mm šířka x 140 mm výška
Tisknutelné materiály	ABS, PLA, DHPE a další
Rychlost tisku	15-19 cm ³ za hodinu
Přesnost	přesnost tiskové hlavy 0,1 mm, šířka tisknuté vrstvy 0,3 mm
Hmotnost	7 Kg
Cena součástek a materiálu	10 - 12 000 Kč

2.3.2 Profesionální 3D tiskárny

Profesionální 3D tiskárny jsou dnes již poměrně rozšířená zařízení a jejich výrobou se zabývá několik firem po celém světě. Jde o zařízení sloužící pro tvorbu prototypů vytvářených většinou pro průmysl či jiná odvětví. Tyto tiskárny jsou dostupné i v některých vzdělávacích nebo vývojových institucích. Pořízení tohoto zařízení je poměrně nákladné. Cena profesionální 3D tiskárny se pohybuje od několika stovek tisíc po miliony korun. Zařízení se liší zejména v několika oblastech. Základní rozdělení 3D tiskáren je především v použité technologii, kterou tiskárna využívá pro stavbu modelu. 3D tiskárny se dále liší např. velikostí tisku, použitím materiálu, dosahované přesnosti a rychlosti tisku. Využití těchto zařízení je zejména v automobilovém či leteckém průmyslu pro tvorbu prototypových součástí. Uplatnění 3D tiskáren k výrobě více dílů nebo menších sérií je v současné době nevýhodné. Na vině je vysoká cena materiálů dodávaných výhradně od společností distribuující daný typ zařízení a prováděná údržba těchto zařízení [1,2].

2.4 Vývoj a možnosti technologie Rapid Prototyping

3D tiskárny dříve nebyli brány z důvodů přesnosti a funkčnosti jako perspektivní technologie. Tyto nedostatky byly postupem času odstraněny a nyní je 3D tisk jednou z důležitých technologií budoucnosti. Vývoj této technologie jde neustále dopředu, zvyšuje se požadovaná přesnost, rychlost tisku a v neposlední řadě i rozmanitost materiálů, které lze využít. Materiály využívané ke tvorbě modelu jsou zejména plasty, vosk a papír. Díky vývoji lze dnes vytvářet modely z keramiky, kovu či slitinových materiálů. Významným ukazatelem perspektivy této technologie je experiment na missourské univerzitě. Byla zde vytisknuta přesná kopie lidské žíly. Tisk byl proveden nanášením biologického inkoustu na speciální želatinový biopapír. Papír se vstřebává během zasychání inkoustu a vytvoří konečný válec (žílu). Biologický inkoust by bylo podle vědců možno nahradit za speciální roztok s lidskými buňkami. Tímto způsobem by bylo možné vytvořit životaschopnou lidskou tkáň. Bylo by tedy možné tisknout celé orgány či jejich poškozené části. Doba, za kterou bude možné tisknout složité lidské orgány je však ještě vzdálená [30].

2.5 Srovnání technologie Rapid Prototyping s konvenčními technologiemi

Výroba prototypů může být provedena mnoha způsoby. Klasické technologie jako jsou např. odlévání, tváření nebo obrábění, mohou být stále častěji nahrazovány moderní technologií RP. Jakož i běžné metody i technologie RP má své výhody i nevýhody. Záleží tedy na požadavcích kladených na prototyp, jaká technologie bude zvolena k jeho výrobě [1,2,5,31].

Hlavní výhody konvenčních technologií:

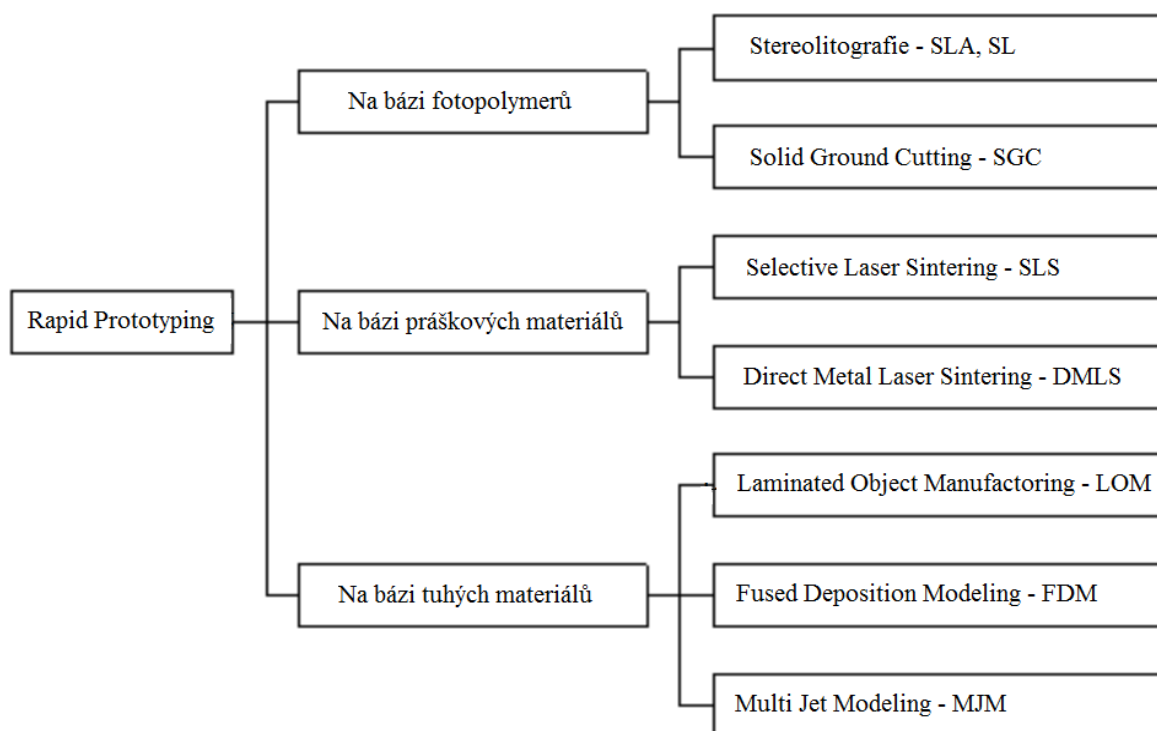
- možnost výroby velkých součástí;
- větší množství využitelných materiálů;
- možnost sériové výroby;
- vyšší kvalita povrchu.

Hlavní výhody technologie RP:

- libovolná geometrie součástí;
- u vybraných metod bezzbytkové využití materiálu;
- výroba je rychlá a v zásadě levná [1,2,5,31].

2.6 Dostupné metody Rapid Prototyping

Všechny metody technologie RP mají společný princip. Tímto principem je postupné přidávání vrstev materiálu, čímž vzniká požadovaný model. Přidávání materiálu je založeno na spékání prášků různých materiálů (kovy, plasty), nanášení vrstev taveniny (plast, vosk) nebo spojování speciálních folií. Komerčně nejvíce využívané technologie RP a jejich rozdělení Obr. 2.5 [1,2,10].



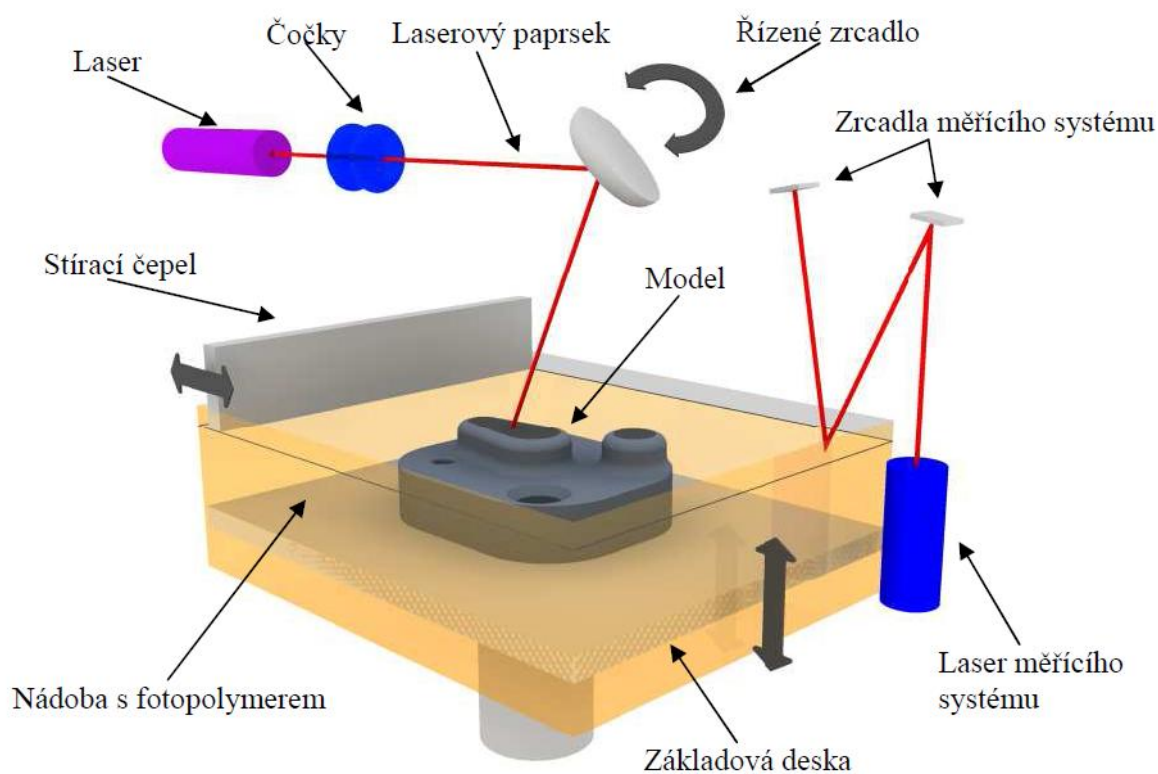
Obr. 2.5 Rozdělení hlavních metod Rapid Prototyping [10].

2.6.1 Stereolitografie SLA

Metoda SLA Obr 2.6 je jednou z nejpoužívanějších a nejpřesnějších metod výroby prototypů. Přesnost výroby prototypů se pohybuje od 0,05 až do 0,2 mm na 100 mm délky. Zajišťuje přitom poměrně rychlou tvorbu master modelu, který nadále slouží k následnému použití. Vytvořený model slouží většinou pouze jako prostředek k výrobě formy. Použitý materiál pro stavbu modelu je většinou epoxidová pryskyřice, která je vhodná k dokončovací operacím, jako jsou broušení, pískování či leštění. Takto upravený model slouží k vytvoření formy, která umožňuje následnou výrobu až několika desítek plastových dílů z polyuretanu či jiného materiálu. Metoda SLA je využívána zejména v automobilovém průmyslu, kdy se na vytvořeném modelu zkouší různé technologické přípravky a nástroje nebo jejich funkčnost v sestavách Obr 2.7. Obvykle je používána také při sestavování tzv. data kontrol modelu, který je využíván k měření rozměrů či geometrie součástí. Vytvořený model lze také využít k designovému návrhu či pouhé vizualizaci součástí [1,2,32,33].

Zařízení pro SLA se skládá z částí:

- pracovní komora s nosnou deskou a epoxidovou pryskyřicí;
- počítač s řídicím softwarem;
- opticko-laserový systém s laserem a soustavou čoček a naklápěcích zrcadel.



Obr. 2.6 Metoda SLA [34].

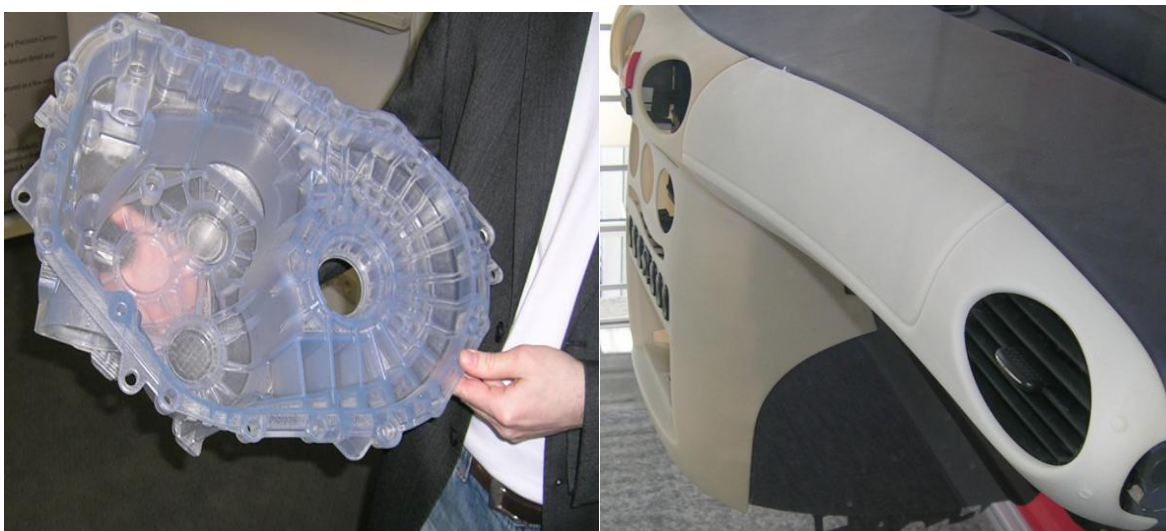
Pracovní komora s epoxidovou pryskyřicí obsahuje pohyblivou nosnou desku, která koná svislý pohyb ve směru osy Z. Celý proces je řízen počítačem obsaženým v řídicí jednotce. Opticko-laserový systém obsahuje plynňý nebo pevno-látkový laser, čočky a soustavu naklápěcích zrcadel, sloužících k usměrnění paprsku laseru. Model vytvářený SLA technologií je založen na vytvrzování 2D vrstev, které jsou získány softwarem ze 3D modelu. Síla jednotlivých vrstev je 0,05-0,15 mm. Nosná deska se po vytvrzení vrstvy posune o tuto hodnotu směrem dolů. Stírací čepel následně zarovná vytvrzenou pryskyřici na požadovanou tloušťku. Dříve než je zahájen celý proces, je nutno zbavit virtuální model chyb, jako jsou např. díry v modelu či špatně nadefinované hrany. Model je nutno umístit do pracovního prostoru s ohledem na následné dokončovací operace. Podpory, které zajišťují stavbu modelu a jeho stabilitu, jsou ze stejného materiálu jako samotná součást. Orientace podpor musí být vždy taková, aby bylo zajištěno jejich snadné odstranění od modelu. Jakmile je tisk dokončen, model je vyjmut z podpor a následně upraven dokončovacími operacemi jako jsou broušení či lakování [1,2,32,33].

Výhody:

- objemné modely;
- dostatečná přesnost;
- široký výběr materiálů;
- není třeba obsluhy;
- čiré modely.

Nevýhody:

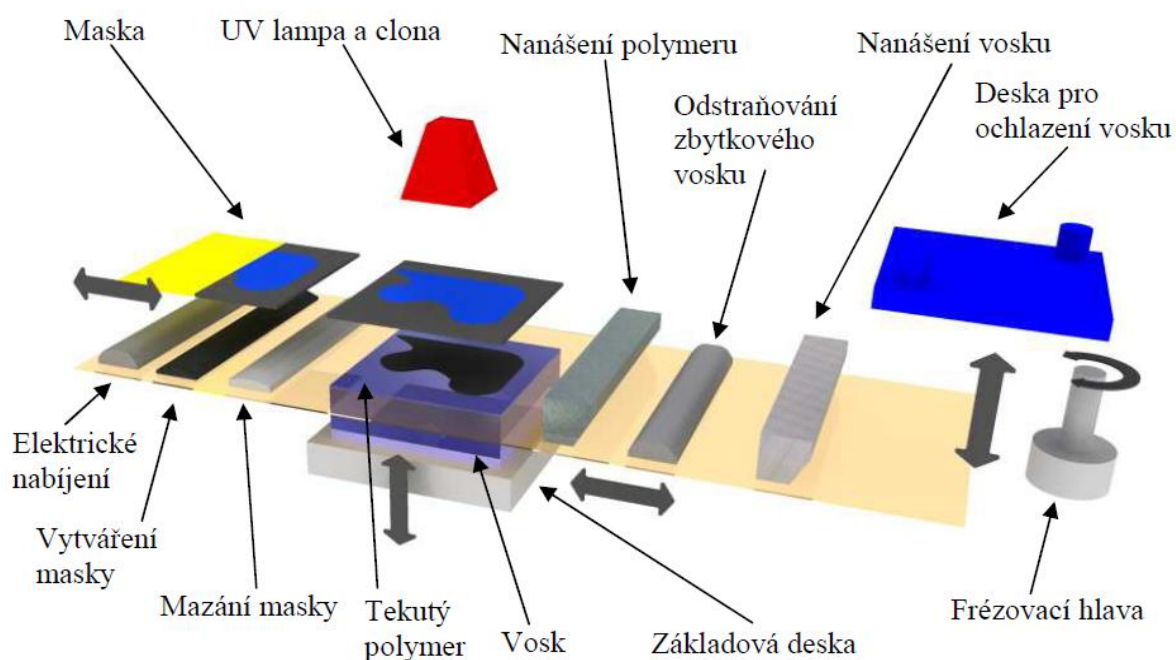
- nutná následná úprava povrchů;
- nutné sušení modelu [1,2].



Obr. 2.7 Vlevo součást vyrobená z materiálu protoCURE PC, vpravo část palubní desky vyrobená z materiálu protoCURE ABS [33].

2.6.2 Solid Ground Cutting SGC

Metoda SGC pracuje na podobném principu jako SLA. Rozdíl metod SLA a SGC spočívá v tom, že zatímco u metody SLA je vrstva vytvrzována laserem postupně, u metody SGC tento děj probíhá najednou Obr 2.8. Metoda byla vyvinuta izraelskou společností Cubital v roce 1987. Společnost vyvinula software, který slouží k importu 3D součástí do obslužného softwaru stroje. Software dále slouží k přípravě dat, která jsou ve formě vrstev vytvořených z virtuálního modelu. Po zpracování dat se na šablonovou desku nanáší speciální toner pomocí ionografického procesu. Tvorba modelu začíná nanesením tenké vrstvy fotopolymerní pryskyřice na nosnou desku. Nad touto vrstvou je umístěna šablonová deska. Působením UV lampy s výkonem 4 kW je pryskyřice za krátkou dobu vytvrzena. Nevytvrzená pryskyřice je následně odsáta a nahrazena výplňovým voskem, který slouží jako podpora. Vrstva vytvrzené pryskyřice a výplňového vosku jsou odfrézovány na požadovanou výšku. Tento proces je několikrát opakován, dokud není vytvořen konečný model Obr 2.9. Jakmile je model vytvořen, je nutné provést dokončovací operace. Možnosti dokončení modelu jsou dodatečné vytvrzení speciální UV lampou a odstranění voskových podpor, což je uskutečněno kyselinou citronovou, která umožní snadné rozpuštění vosku [1,2,34].



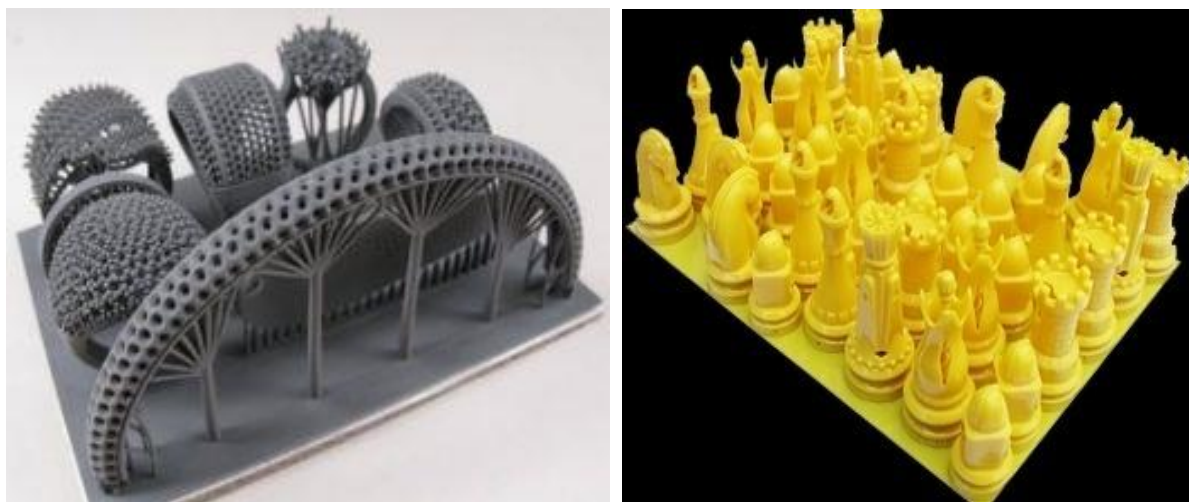
Obr. 2.8 Princip metody SGC [34].

Výhody:

- minimální smrštění modelu;
- dobrá struktura modelu;
- stabilita modelu;
- tvorba modelu neprodukuje zápach;
- vysoké využití stavebního materiálu.

Nevýhody:

- hlučné zařízení;
- tvorba odpadu;
- usazeniny vosku;
- velké a rozměrné zařízení [1,2].

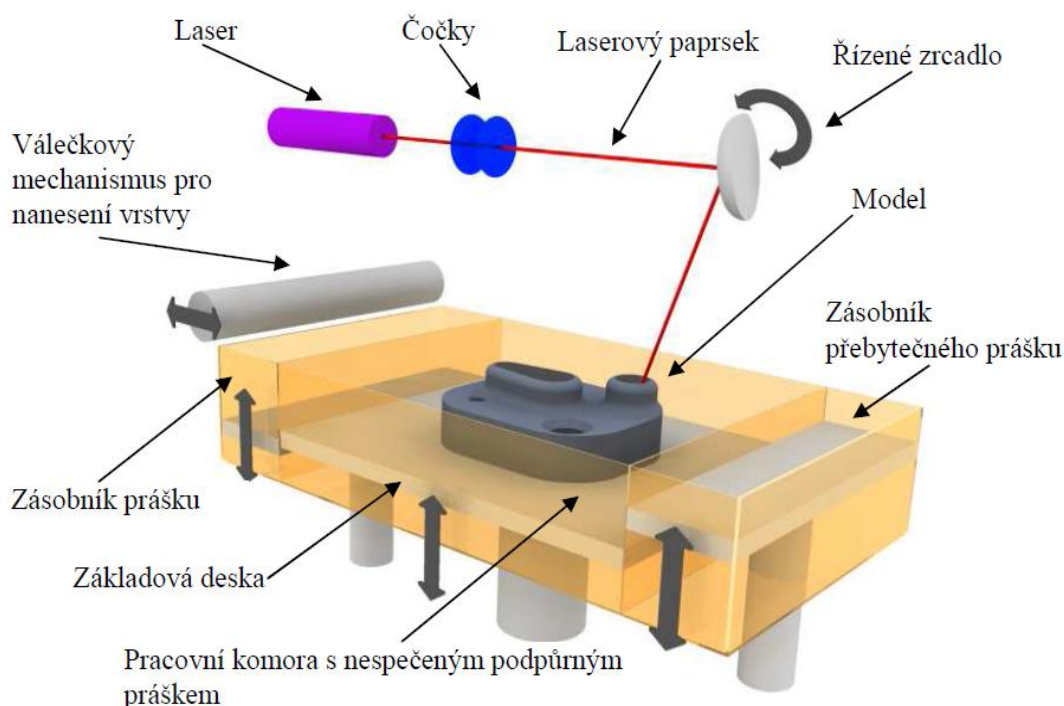


Obr. 2.9 Modely vytvořené metodou SGC [35].

2.6.3 Selective Laser Sintering SLS

Metoda SLS Obr. 2.10 podobně jako ostatní adaptivní technologie pracuje na principu přidávání vrstev materiálu na vytvářený model. Materiál používaný u metody SLS je ve formě velmi jemného prášku o zrnitosti 20 až 100 μm . Vrstvy přidávaného prášku jsou na model natavovány CO_2 laserem. Jako podpora slouží okolní prášek, který je po vyjmutí modelu odstraněn. Z těchto důvodů není třeba u metody SLS tvorba podpor. Aby bylo zabráněno oxidaci kovového materiálu při natavování, je pracovní prostor vyplněn inertním plynem, nejčastěji dusíkem či argonem. Data vkládána do zařízení jsou ve formátu *.stl. Většina systémů však umožňuje práci i s jinými formáty za předpokladů využití přídatných modulů. V příslušném softwaru jsou ze součásti vytvořené jednotlivé vrstvy, které slouží k vygenerování dráhy laseru. První vrstva prášku je nanášena na podkladovou desku a natavena laserem na teplotu tání. Při této teplotě se materiál nataví a dochází ke spečení prášku. Řídicí systém zajišťuje intenzitu paprsku tak, aby došlo ke spečení materiálu pouze v požadovaných místech a okolní nespečený materiál vytvořil podporu modelu. Jakmile je dokončena první vrstva, nosná deska je posunuta směrem dolů o tloušťku jedné vrstvy. Následně je nanášena další vrstva prášku, což je zajištěno speciálním válečkovým mechanismem. Materiál je znovu spečen a proces se opakuje až do vytvoření konečného modelu. Jakmile proběhne nanášení poslední vrstvy materiálu, je na model nanášeno několik centimetrů prášku, což zajišťuje rovnoměrné chladnutí modelu. Po vychladnutí je součást vyjmuta ze zařízení a odstraněna od podkladové desky. Součást je nutno dále upravit dokončovacími operacemi jako jsou např. broušení, obrábění, tryskání a leštění. Materiály využívané metodou SLS jsou různorodé, patří sem zejména plasty, kovy, pryž, keramika a speciální písky. Modely vytvořené metodou SLS Obr. 2.11 mají díky použitým materiálům výborné mechanické vlastnosti a jsou hojně využívány pro výrobu prototypů, které jsou

určeny k testování zátěžovými zkouškami. Využitelné jsou také při tzv. crash-testech nebo při extrémních provozních podmínkách. Další oblastí využití je výroba forem, nástrojů, jader s chladičnými kanálky nebo součástí se složitými komorami či dutinami [1,2,32,34].

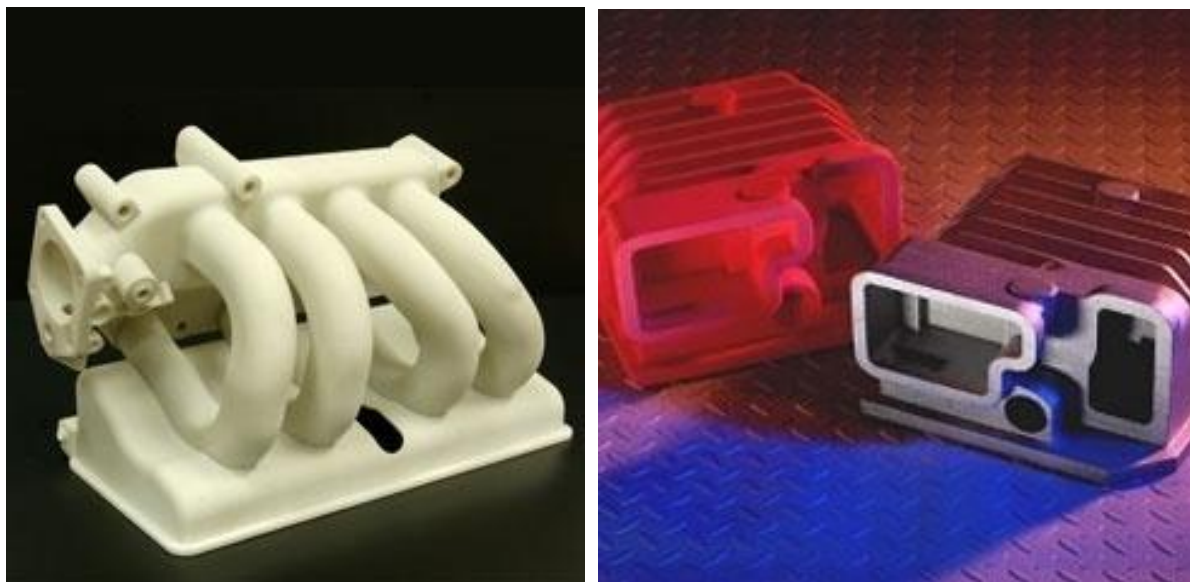


Obr. 2.10 Princip metody SLS [34].

Metody dle použitého materiálu a využití prototypů:

- **Laser - Sintering Plastic:** metoda používá několik druhů plastických materiálů. Často využívaným materiálem je polystyren, který slouží k výrobě součástí technologií odlévání. Jako další materiál je využíván nylon, který díky výborným mechanickým vlastnostem, jako jsou tvrdost, houževnatost a teplotní odolnost bývá často použit k výrobě součástí, které jsou nadále funkčně či mechanicky testovány;
- **Laser - Sintering Metal:** metoda pracuje s velmi jemnými, speciálně vyrobenými prášky. Modely vyrobené touto technologií mají výborné mechanické vlastnosti, takže jejich využitím lze vyrobit funkční prototyp, který je nadále testován. Využití této metody nachází také v tvorbě vstřikovacích nebo lisovacích forem pro plasty;
- **Laser - Sintering Ceramic:** využívaný materiál je prášek spojovaný tekutým pojivem. Nanášení pojiva je provedeno pomocí tryskové hlavy, která je vedena dle předem vypočtených údajů. Tímto způsobem jsou vyráběny modely z keramických prášků, jako jsou jádra či formy pro technologii přesného lití;
- **Laser - Sinteric Formsand:** metoda pracuje se speciálním slévárenským pískem. Vytvrzením tohoto písku lze vyrobit formu pro běžné slévárenské lití;

- Laser – Micro Sintering: jako výchozí materiál je použit wolfram. Prášek o velmi malé zrnitosti je spečen pomocí laseru. Model je vytvořen po velmi malých vrstvách, které dosahují pouze 0,03 mm. Tímto způsobem je možno vytvořit součást o vysoké kvalitě povrchu, který může dosahovat $Ra\ 1,5\ \mu m$ [1,2,34,36].



Obr. 2.11 Modely vyrobené metodou SLS [37].

Výhody:

- vysoká pevnost součástí;
- tvorba funkčních prototypů;
- velké množství materiálů;
- tvorba bez podpor modelu;
- možnost nastavení parametrů i během tisku.

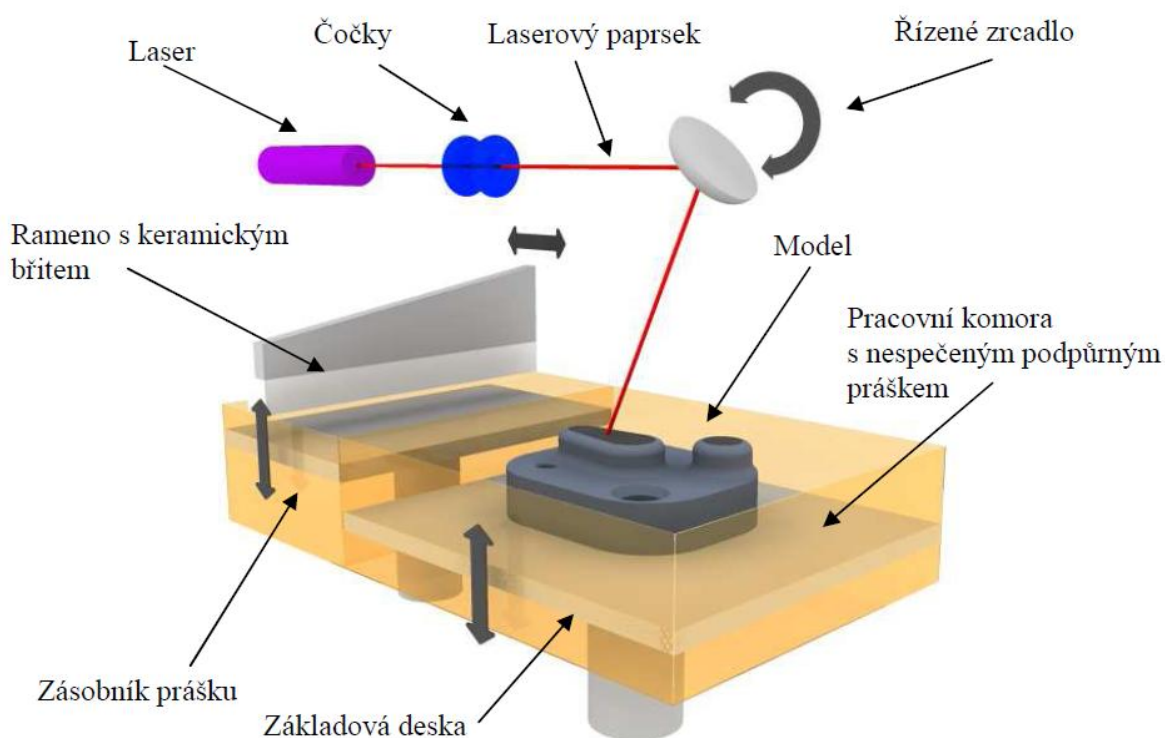
Nevýhody:

- prostorová a energetická náročnost;
- nízká kvalita povrchu;
- nižší přesnost s ohledem na tloušťku vrstvy;
- nutné dokončení povrchu [1,2,32].

2.6.4 Direct Metal Laser Sintering DMLS

Technologie DMLS využívá při stavbě modelu laser, kterým je natavována velmi jemná vrstva prášku Obr 2.12. Tvorba modelu začíná importem 3D dat do procesního softwaru. Pomocí softwaru je zkontrolována správnost zadaných dat, určena pozice modelu na podložce a voleny vhodné podpory pro stavbu součástí. Tloušťka výrobní vrstvy je 0,02 mm nebo 0,04 mm, přičemž větší vrstva krátí výrobní čas, ale zhoršuje dosahovanou kvalitu modelu. Ze součástí jsou následně vytvořeny vrstvy, které jsou odeslány do příslušné

3D tiskárny. Model je stavěn na speciální ocelové platformě, která slouží také k odvodu tepla z modelu. Na tuto platformu je nanášen ocelový prášek pomocí ramene s keramickým břitkem. Rameno rozprostírá prášek rovnoměrně dle zvolené vrstvy. Laser následně taví kovový prášek v dráze trajektorie, která odpovídá kontuře řezu. V místě dopadu paprsku dochází k protavení prášku i podkladové vrstvy. Materiál je tedy dokonale spojen a následně tuhne do pevného stavu. Takto se proces opakuje až do konečného vytvoření samotné součásti. Pracovní komora, ve které probíhá stavba modelu, bývá ve většině případů vyplněna dusíkem či argonem. Tyto plyny tvoří v komoře ochranou atmosféru a zabráňují oxidaci materiálu. Během stavby je model fixován podpůrnou strukturou, která je spojena s ocelovou platformou. Podpůrná struktura je vytvářena zároveň s výrobkem. Tato struktura je po vytvoření modelu odstraněna z povrchu výrobku. Povrch je nutno upravit několika dokončovacími operacemi jako jsou např. broušení, tryskání a leštění. Metoda DMLS nahrazuje výrobu prototypů tvořených klasickými technologiemi, u kterých je výroba prototypů v řádech dnů až týdnů. S využitím metody DMLS se tyto časy výrazně zkrátí na hodiny, případně dny. Proces tvorby modelu probíhá plně automaticky v nepřetržitém režimu. Využití materiálu je v tomto případě velmi vysoké, až 98% zbylého neztaveného materiálu lze znovu použít k tvorbě dalších součástí. Tato hodnota je poměrně značná v porovnání s jinými běžnými technologiemi, jako jsou např. obrábění či odlévání [1,2,34,38].



Obr. 2.12 Princip metody DMLS [34].

Technologie DMLS umožňuje stavbu menších až středních dílů, přičemž splňuje i požadovanou přesnost a funkčnost vyrobených součástí. Lze vyrábět odolné, avšak vysoce přesné komponenty, které nachází uplatnění v automobilovém, leteckém a strojním průmyslu Obr 2.13. Stále častěji je metoda DMLS využívána v oblasti medicíny, kde je využívána k tvorbě např. dentálních náhrad, implantátů nebo speciálních nástrojů [1,2,38].

Nejčastěji používané kovové materiály:

- korozivzdorná ocel EOS GP1;
- martenzitická ocel EOS MS 1;
- slitina bronz-nikl DM 20;
- ocel DS 20;
- kobalt chrom EOS CC MP 1;
- titan EOS Ti 64/Ti 64ELI [1].



Obr. 2.13 Prototypové díly vyrobené technologií DMLS. Vlevo prototypový díl z kobalt-chromu, vpravo řez vložkou s vnitřním chlazením z martenzitické oceli [38].

Výhody:

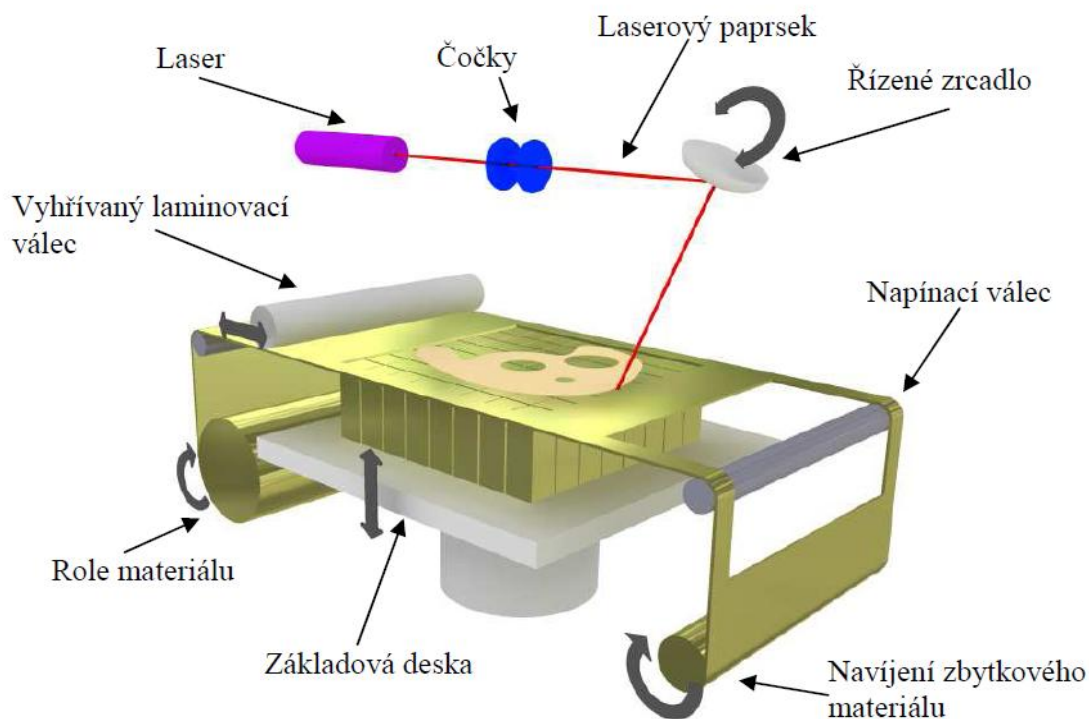
- pevnost modelů;
- velké množství použitelných materiálů;
- možnost tvorby plně funkčních prototypů;
- není potřebné dodatečné vytvrzování;
- plně automatizovaná tvorba modelu.

Nevýhody:

- prostorově a energeticky náročné zařízení;
- nízká kvalita povrchu;
- dlouhý čas potřebný na zahřátí a ochlazení zařízení;
- stavba podpor;
- nutnost dokončovacích operací [1,2,38].

2.6.5 Laminated Object Manufacturing LOM

Metoda LOM využívá tuhých materiálů v podobě fólií Obr. 2.14. Fólie jsou přilepovány k předchozí vrstvě pomocí příslavného nátěru. Pomocí laseru je vytvořen samotný tvar kontury. Tloušťka položené folie má stejnou velikost jako tloušťka modelové vrstvy. Technologie LOM pracuje pouze s jedním druhem materiálů, kterým je tvořen model i podpůrná struktura. Data jsou ve formátu *.stl zaslána do příslušného softwaru, kde jsou dále zpracovávána na jednotlivé vrstvy, kterými je model vytvořen. Měřítko modelu a jeho umístění v pracovním prostoru jsou voleny s ohledem na jeho velikost a tvar před samotným zahájením výroby. Na nosnou desku je umístěna jedna vrstva materiálu, která je ořezána asi 20 mm od okraje budoucího modelu. Zbytek plochy je pokryt oboustrannou lepicí páskou, přičemž je nutno odstranit přebytečný papír. Rám se skládá z kvádrů tloušťky 3 až 8 mm a je široký 25x25mm. Jeho umístění je na samotné nosné desce a slouží k odstranění kroucení modelu během procesu výroby. Prototyp je tvořen kladením jednotlivých vrstev fólií na sebe. Spojení těchto vrstev je zajištěno přitlakem, který vytvoří válec zahřátý na 330°C. Tato teplota je podstatná pro aktivaci pojiva na spodní straně folie. Laser následně vyřeže kontury jednotlivých vrstev modelu a přebytečný materiál je rozřezán na jednotlivé kvádry. Tento proces se opakuje až do samotného vytvoření celé prototypové součásti. Přebytečný okolní materiál je na konci procesu odstraněn od modelu pomocí tenkého drátu či dláta. Hotový model je následně připraven na dokončovací operace, jakou jsou běžné obrábění, broušení, leštění a barvení. Povrch součásti je nutno po dokončovacích operacích pokrýt silikonovým, uretanovým nebo epoxidovým nástřikem, který zabrání vsakování vlhkosti do modelu a tím změně rozměrů a tvaru [1,2,34].

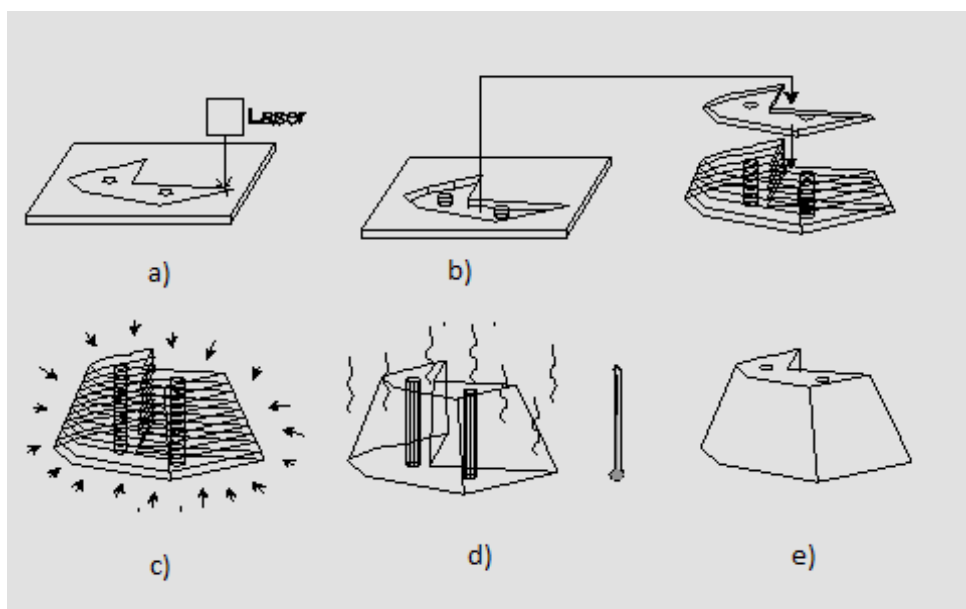


Obr. 2.14 Princip metody LOM [34].

Z technologického hlediska se metoda LOM dělí na dvě skupiny dle sledu operací:

- vyřezávání a lepení (VaL);
- lepení a vyřezávání (LaV) [2].

V oblasti vývoje a komerčního využití se technologií LOM zabývá celosvětově přibližně 13 firem, které se zabývají výrobou zařízení pro tvorbu prototypů nebo prodávají komerčně dostupné zařízení. Mezi nejvíce komerčně rozšířené firmy patří Cubic Technologies USA, KIRA Corporation Japonsko. Technologií LOM lze vyrábět jednoduché prototypy sloužící zejména k vizualizaci, marketingu a prezentaci nových výrobků. Běžné materiály sloužící k výrobě prototypů jsou zejména PVC Obr 2.16 a papír. Modifikací procesu LOM lze využít širší spektrum materiálů např. keramika a kovy Obr 2.15. Takto modifikovaný systém nevyužívá fólii jako modelovací materiál, ale jako nosné médium, na které je aplikována vrstva keramiky nebo kovového prášku. Prototyp je stavěn technologií LOM VaL. Po vytvoření je model umístěn do univerzální pece, kde je vlivem teploty (700°C - 1300°C) odpařen nosný materiál a prášek je spečen do podoby konečné součásti [1,2,39].



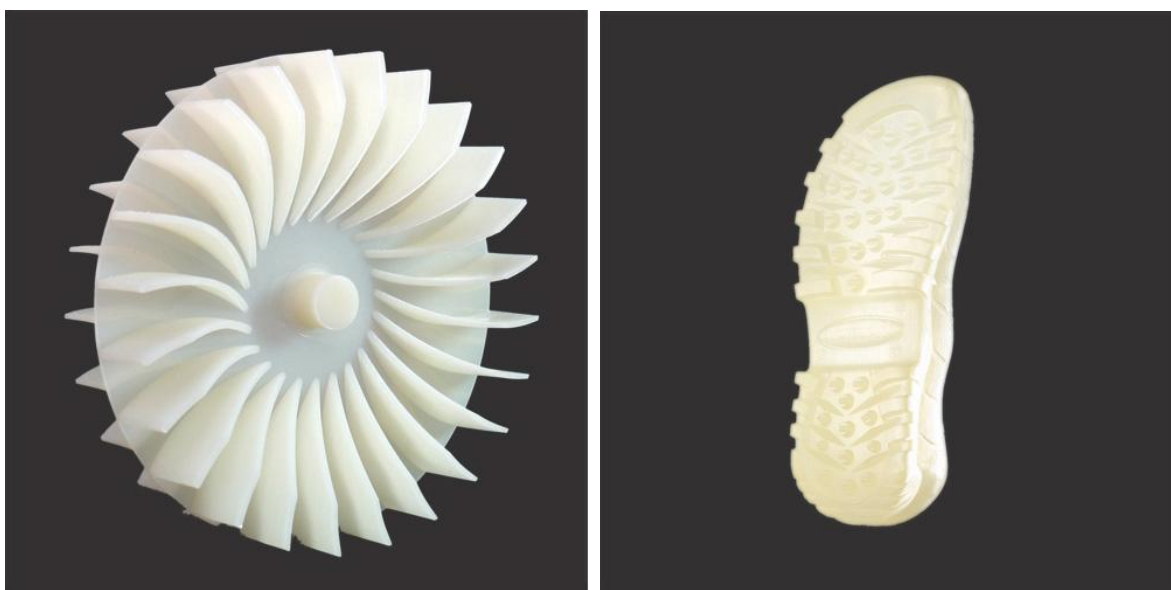
Obr. 2.15 Modifikovaná metoda LOM pro vytváření kovových či keramických prototypů
a) Vyřezávání kontury laserem, b) Skládání kontur, c) Laminování, d) Spékání, e) Prototyp [39].

Výhody:

- možnost využití jakéhokoli materiálu ve formě fólie;
- rychlost zařízení;
- přesná metoda;
- eliminace smrštění;
- nejsou nutné podpory;
- možnost tvorby větších součástí v porovnání s ostatními metodami RP;
- nízké náklady na materiál (papír, plast).

Nevýhody:

- nevhodnost pro modely s tenkou stěnou;
- pevnost modelu je omezena použitým pojivem;
- zdoluhavé odstraňování podpor;
- vysoká spotřeba materiálu bez ohledu na velikost součásti [1,2].

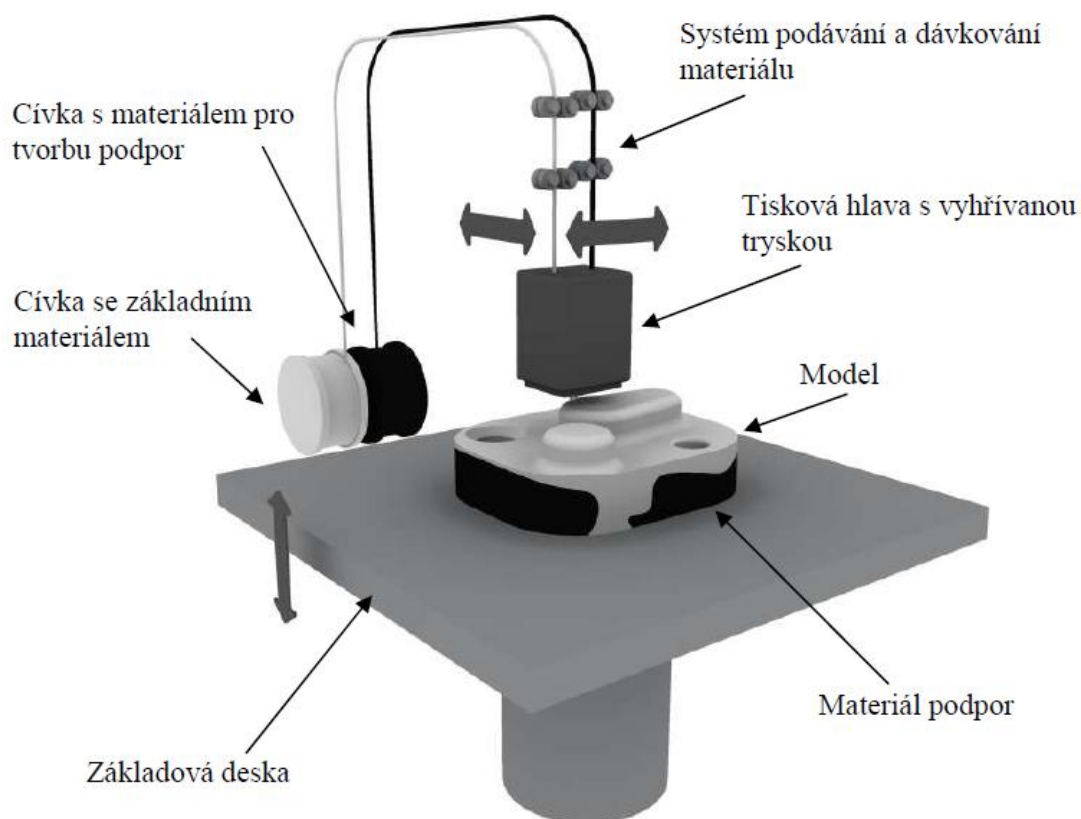


Obr. 2.16 Prototypové díly vyrobené technologií LOM [40].

2.6.6 Fused Deposition Modeling FDM

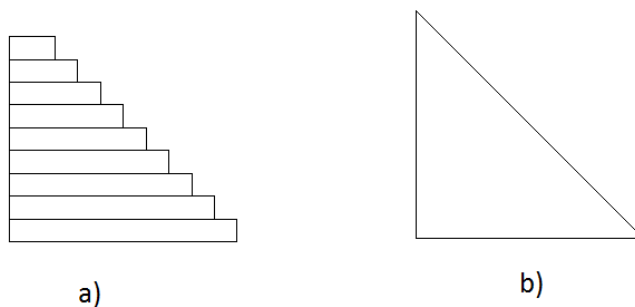
Tato technologie byla předvedena Scottem Crampem v roce 1988. Patent získal ovšem až o 3 roky později. Jde tedy o poměrně mladou, avšak nyní již velmi často používanou metodu výroby prototypů. Stavba modelu metodou FDM spočívá v nanášení vrstev nataveného polotekutého termoplastického materiálu, který je vtlačován pomocí kladek do vyhřívané trysky Obr. 2.17. Materiál okamžitě po vytlačení tvrdne. Jakmile je nanášena první vrstva, pracovní plocha se zvedne o výšku následující vrstvy a celý proces se opakuje. Data jsou importována ve formátu *.stl do softwaru CatalystEX, který vyvinula společnost Statasys. Systém umožňuje nastavení vlastností tisku, jako jsou např. tloušťka nanášených vrstev, typ podpor, způsob vyplnění objemu prototypu, měřítko součástí, objem použitého materiálu a umístění modelu na základní desce. Orientace součásti na podložce a volba typu strategie mají významný vliv na pevnost vyrobené součásti. Metoda FDM pracuje s dvěma druhy materiálu. První je materiál stavební, který slouží ke stavbě samotného modelu. Druhý materiál je podpůrný, který slouží ke stavbě podpor modelu a zabránění jeho případnému hroucení. Materiály jsou použity ve formě drátu, který je navinut na dvou cívkách. Podpory jsou vytvářeny podél modelu nebo pod modelem a zajišťují stabilitu vytvářeného modelu. Podpůrný materiál je dělen do dvou typů. První typ podpůrného materiálu má vyšší pevnost než samotný stavební materiál a po dokončení procesu tvorby modelu je nutné jej mechanicky odstranit. Odstranění takto vytvořené podpory může být problém, zvláště v těžko dostupných místech. Druhý typ podpůrného materiálu je rozpustný ve speciálním aktivním roztoku. Materiály používané k samotné stavbě modelu technologií FDM jsou především z termoplastu ABS nebo ABSplus. Další využívané materiály jsou např. PC, PPSF, a PIT.

Tyto materiály mají pevnost v tahu od 22 do 72 MPa a jejich teplotní odolnost je do 189°C. U některých materiálů je dostupná široká škála barev, případně i poloprůsvitné materiály [1,2,34].



Obr. 2.17 Princip metody FDM [34].

Součásti vytvořené metodou FDM slouží např. k testování funkčnosti, ověření sestavení jednotlivých dílů, k vizualizaci a prezentaci jednotlivých modelů nebo také k výrobě silikonových forem. Základním nedostatkem těchto modelů je tzv. schodkový efekt Obr 2.18. Schodkový efekt vzniká při nanášení jednotlivých vrstev materiálu. Výška jednoho schodku je přitom rovna výšce vrstvy naneseného materiálu. Součást s takto vytvořeným povrchem je nutno dále povrchově upravit. Mezi běžné úpravy nejčastěji patří tmelení, broušení, lakování, pokovování a barvení [1, 2].



Obr. 2.18 a) Součást se schodkovitým povrchem, b) Součást s ideálním povrchem.

Výhody:

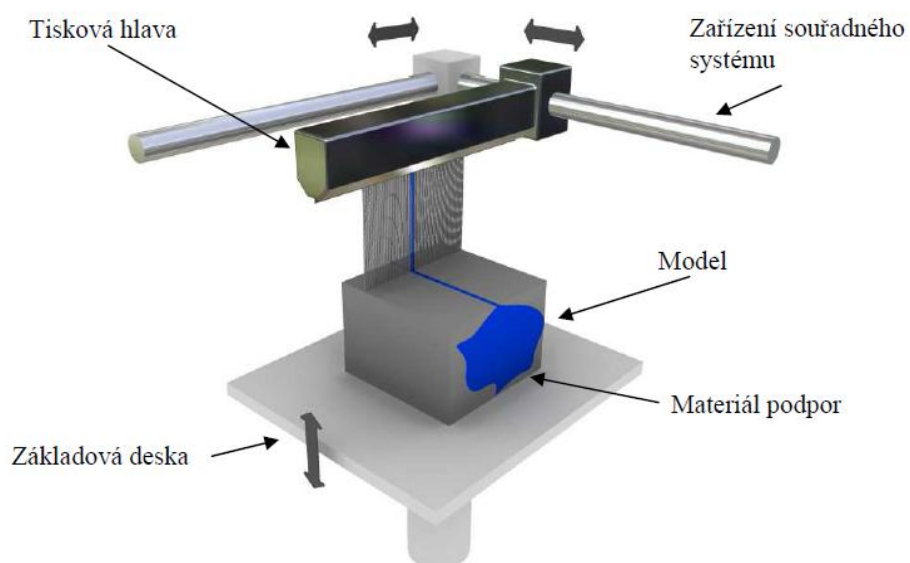
- výroba funkčních prototypů;
- minimální odpad (pouze podpory);
- snadné odstranění podpor;
- široký sortiment materiálů;
- nízké provozní náklady;
- netoxická výroba;
- bezúdržbový proces;
- plně automatická výroba součástí.

Nevýhody:

- omezená přesnost;
- smršťování materiálu;
- omezená pevnost ve směru výstavby vrstev;
- pomalý proces [1,2].

2.6.7 Multi Jet Modelig MJM

Metoda MJM Obr. 2.19 spočívá v nanášení jednotlivých vrstev termopolymeru nebo vosku. K nanesení je použita tisková hlava, která obsahuje až 352 trysek. Nanášecí trysky jsou umístěny rovnoběžně vedle sebe v délce 200 mm. Celý systém nanášení je řízen softwarem, který řídí dávkování materiálu jednotlivými tryskami. Součást je stavěna na základní desku, která se pohybuje pouze v ose Z. Základní deska je vždy po nanesení vrstvy materiálu posunuta směrem dolů o výšku nanesené vrstvy. Pracovní hlava se pohybuje v osách X, Y a nanáší miniaturní kapky materiálu, které tvoří jednotlivé vrstvy modelu. Opakováním procesu dostaneme požadovanou součást ve velice krátkém čase. Při stavbě modelu dochází i k vytváření podpor, které jsou po ukončení tvorby modelu odstraněny [1,2,34].



Obr. 2.19 Princip metody MJM [34].

Výhody:

- ekonomická výroba;
- jednoduché zařízení;
- rychlá metoda výroby prototypu.

Nevýhody:

- nízká přesnost;
- výroba menších součástí v porovnání s ostatními RP metodami;
- omezená volba materiálu;
- nízká přesnost [1,2,]

3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

V této kapitole je ověřen a popsán postup výroby prototypu tvarově složité součásti s využitím RI a technologie RP. Jako navazující technologie byla zvolena technologie Rapid Tooling. Jde o výrobu silikonové formy sloužící k odlití zkušební série prototypů z pryskyřice.

3.1 Získání dat modelu

Cílem skenování bylo získat data tvarově složité součásti a vytvoření 3D modelu. Jako experimentální součást byl zvolen stojan na mobilní telefon ve tvaru lidské ruky Obr 3.1. Jedná se o tvarově složitou součást, kterou by bylo náročné vytvořit v jakémkoli modelářském programu. Přesnost by byla velice malá a časová náročnost tohoto modelování by zabrala až několik dní.



Obr. 3.1 Experimentální model stojanu na mobilní telefon.

K získání dat byla tedy zvolena technologie RI. Vzhledem ke složitým a poměrně drahým skenovacím zařízením bylo využito spolupráce se společností MCAE Systems, s.r.o. Společnost má moderní vybavení i bohaté zkušenosti s problematikou RI a 3D skenování. Skenování bylo díky této spolupráci provedeno v prostorách společnosti na moderním skenovacím zařízení ATOS II Tab. 3.1. ATOS II je mobilní bezdotykový skener vyráběný firmou GOM. Tento skener promítá na povrch tělesa pruhy světla, které jsou snímány dvěma kamerami vybavenými CC čipem. Tento skener je díky své velikosti přenosný a je možno s ním skenovat předměty téměř libovolných rozměrů [24].

Tab. 3.1 Parametry skeneru ATPS II [24].

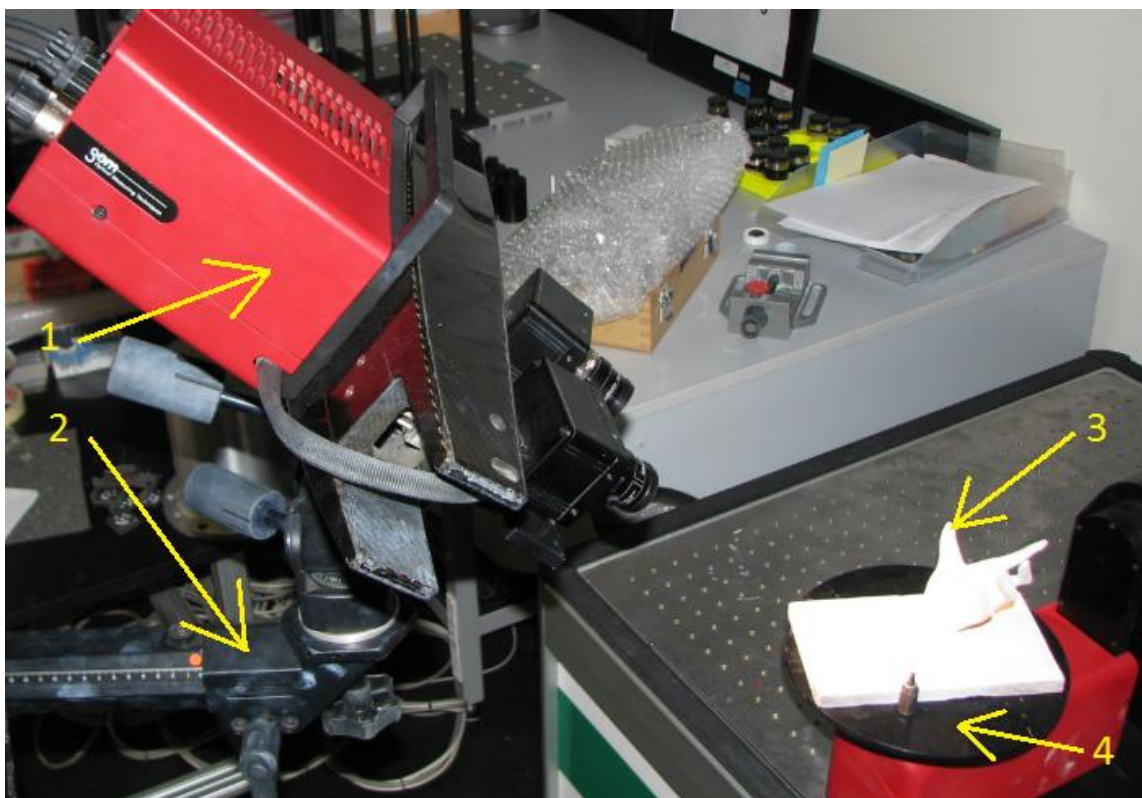
Systém	ATOS II Triple Scan
Rozlišení CCD čipu	2 x 5 000 000
Plocha měření (mm²)	38 x 29 – 1500 x 1130
Hustota bodů	0,02 – 0,62
Počet naměřených bodů na jeden záběr	5 milionů
Použitá technologie	Modré světlo
Řídící jednotka skeneru	Internal
Laserové odměřování vzdálenosti	Ano

Optický skener ATOS II, stejně i jako jiné druhy optických skenerů, má problém se snímáním lesklých či průsvitných materiálů. Před samotným skenováním bylo tedy nutné nastříkat model titanovým bílým práškem z důvodu světelné propustnosti a průsvitnosti materiálu modelu. Tento speciální prášek pokryl součást jemnou neprůsvitnou vrstvou, která umožnila lepší odraz světla Obr. 3.2. Čas této operace je uveden v Tab. 3.2.



Obr. 3.2 Nanesení neprůsvitného titanového prášku na model.

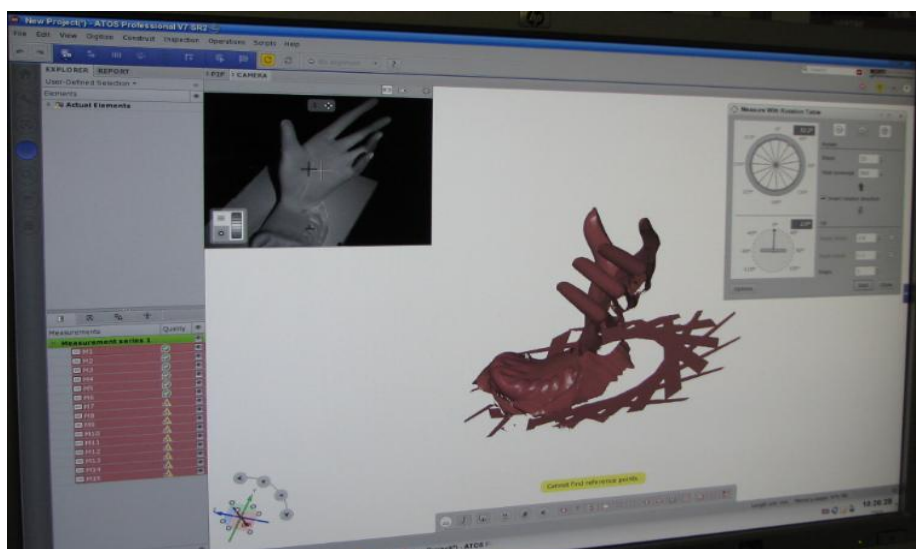
Skenovaný model byl následně umístěn na automatický otočný stojan, který svým otáčením zajistil snímání modelu ze všech stran. Optický skener ATOS II byl tedy ve statické poloze Obr 3.3. Čas operace skenování je uveden v Tab. 3.2.



Obr. 3.3 Průběh skenování modelu, 1) Optický skener ATOS II, 2) Nastavitelné statické rameno skeneru, 3) Skenovaný model, 4) Automatický otočný stojan.

3.2 Úprava a zpracování dat

Výstupní data z optického skeneru ATOS II byla exportována ve formě tzv. mraku bodů. Tyto data byla upravena v systému ATOS Professional V7 SR2 Obr. 3.4. Výstup ze systému byl generován ve formátu *.stl Obr. 3.5. Časová náročnost celého procesu byla uvedena v Tab. 3.2. Model bývá většinou nutno upravit v některém 3D modelářském programu, kde jsou data převedena na plnohodnotný 3D model. S takto upraveným 3D modelem je možno běžně pracovat a provádět změny či nejrůznější úpravy součástí, např. vytvoření otvorů, odlehčení, vyztužení nebo změnu designu. Data modelu prototypu získaná skenováním a upravená v daném systému byla ve vysoké kvalitě, tudíž nebylo nutné provádět změny a úpravy v softwaru SolidWorks, což výrazně ulehčilo práci a ušetřilo čas vynaložený na experiment. V případě vytvoření modelu technologií RP byl tedy plně dostačující formát *.stl, generovaný systémem.



Obr. 3.4 Úprava dat systémem ATOS Professional V7 SR2.



Obr. 3.5 Výsledný model ve formátu *.stl po úpravě dat.

Tab. 3.2 Celková časová náročnost získání dat technologií RI:

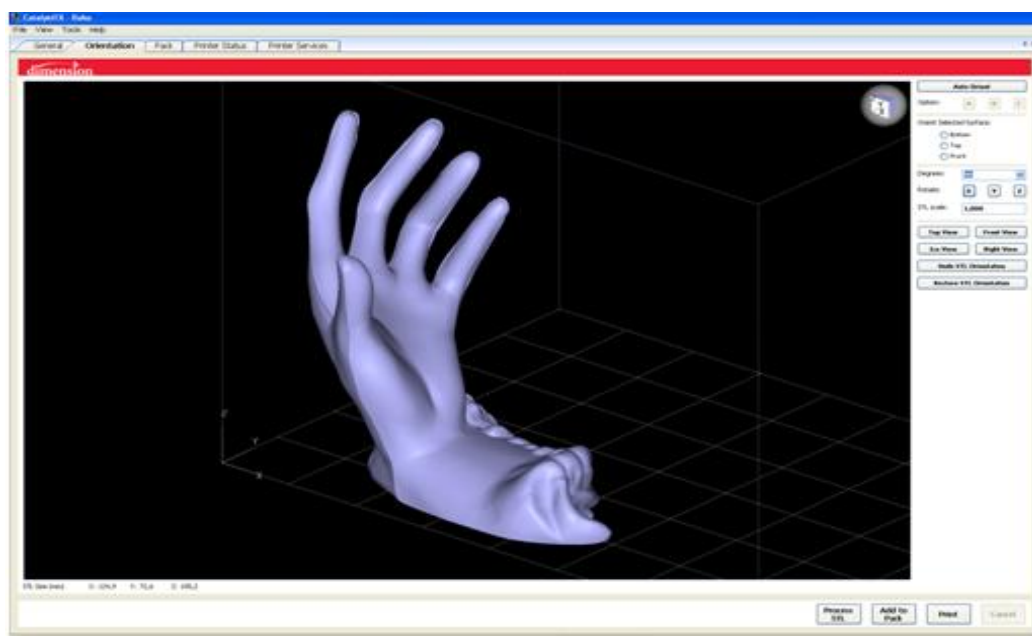
Nástřik modelu bílým titanovým práškem	5 minut
Skenování modelu	20 minut
Úprava dat	15 min
Celkový čas	40 minut

3.3 Tisk prototypu

Příprava modelu a nastavení tisku bylo provedeno v systému CatalystEX. Tisk prototypu byl proveden tiskárnou uPrint od společnosti Dimension. Tiskárna uPrint pracuje metodou FDM a jako stavební materiál prototypu byl použit termoplast *ABSplus*.

3.3.1 Příprava digitálního modelu v softwaru CatalystEX

Software CatalystEX je obslužný program pro tiskárnu uPrint a veškeré nastavení a příprava tisku probíhaly v tomto softwaru. Data modelu byla importována do systému ve formátu *.stl Obr 3.6 [43].



Obr. 3.6 Import modelu do systému CatalystEX [43].

Práce se systémem začala importem dat součástí. Model byl nadále upraven v pracovním prostoru a umístěn do pracovního souřadného systému. Následně byla v systému CatalystEX provedena veškerá nastavení vlastností nezbytných pro tvorbu modelu 3D tiskárnou Obr 3.7.

Properties

Layer resolution:	0,2540
Model interior:	Sparse - high density
Support fill:	Sparse
Number of copies:	1
STL units:	Millimeters
STL scale:	1,000

Obr 3.7 Nastavení vlastností tisku v systému CatalystEX [43].

Velikost vrstev (Layer resolution) bylo možné nastavit ve třech variantách:

- 0,178 mm;
- 0,254 mm;
- 0,330 mm.

Vzdálenost jednotlivých vrstev byla nastavena dle druhu tiskárny, na které byl tisk proveden. V našem případě byla volena vzdálenost 0,254 mm. Vzdálenost vrstev má výrazný vliv na kvalitu povrchu vytvořeného modelu [43].

Vyplnění modelu (Model interior) bylo možno provést ve třech provedeních:

- Solid;
- Sparse - high density;
- Sparse - low density.

Varianta vyplnění modelu je volena dle následného použití prototypové součásti. U běžných modelů je nejčastěji používáno vyplnění Solid, které vyplní materiálem takřka celý objem modelu. U součástí s požadavky na pevnost nebo u součástí určených k následnému obrábění je volena výplň Sparse - high density. Toto vyplnění zajistí dostatečnou pevnost a zároveň úsporu materiálu. U součástí sloužících k vizualizaci, u kterých nejsou kladeny požadavky na pevnost, je využíváno výplně Sparse - low density. V případě tvorby prototypu stojanu na mobilní telefon byla zvolena výplň Sparse - high density. Na model byly kladeny pevnostní požadavky z důvodu jeho dalšího opracování a následné tvorby silikonové formy. Volba výplně má zásadní vliv na čas tvorby modelu a také na jeho cenu. S rostoucí hustotou výplně roste i objem spotřebovaného materiálu a tím i jeho cena [34,43].

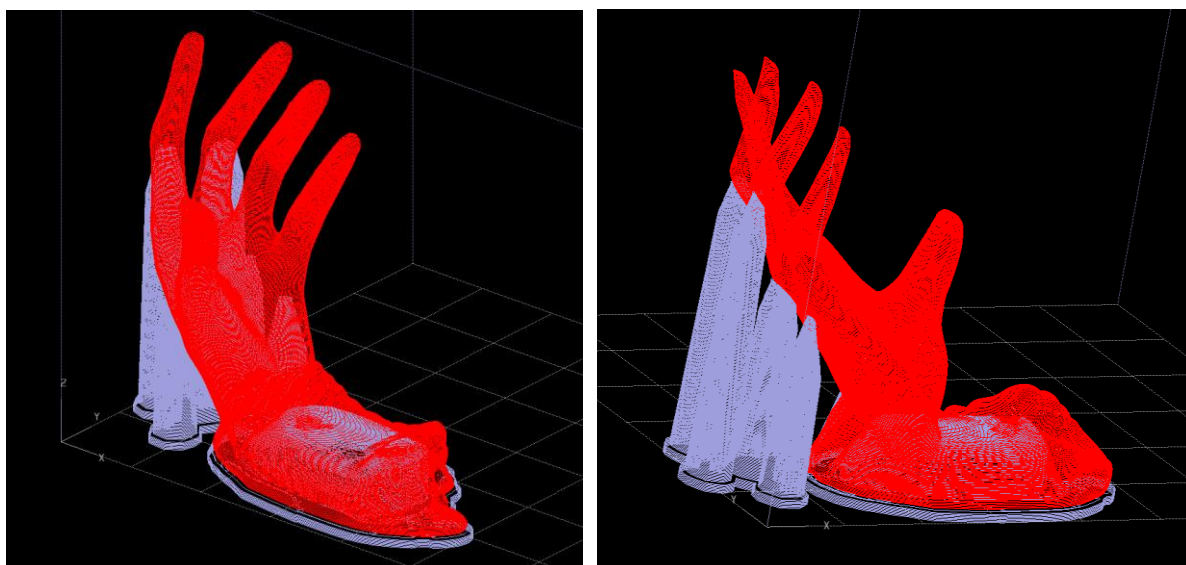
Dalším krokem při práci se systémem bylo automatické vytvoření podpor. Podpory byly vytvořeny v místech, kde je část modelu nakloněna nebo přesahuje mimo tělo modelu. V těchto místech by během stavby hrozila deformace či dokonce hroucení modelu.

Výplň podpor (Support fill) bylo možno volit z několika různých variant:

- Basic;
- Sparse;
- Minimal;
- Break-away;
- Surround [43].

Každá z těchto variant stavby podpory slouží pro rozdílné tvarově složité součásti. V případě výroby prototypu stojanu na mobilní telefon byla zvolena varianta Sparse Obr. 3.8. Jde o poměrně řídkou tvořenou podporu, ale pro stavbu daného modelu plně dostačující [43].

Další volené parametry tisku v systému CatalystEX byly počet kopií (Numbers of copies), nastavení jednotek (STL unit) a měřítko vytvořené součásti vůči 3D modelu (STL scale) [43].



Obr 3.8 Automatické generování podpor a jednotlivých vrstev součásti [43].

Systém CatalystEX umožňuje zobrazení vlastností tisku. Po zpracování dat systém vygeneroval celkovou délku tisku. Systém umožní zobrazit i celkový materiál zbývající v kazetách, množství spotřebovaného materiálu pro stavbu samotného modelu nebo také množství spotřebovaného materiálu pro stavbu podpor Tab. 3.3. Tato výhoda umožňuje kalkulaci ceny ještě před vytvořením prototypu [43].

Tab. 3.3 Vlastnosti tisku prototypu stojanu na mobilní telefon [43].

Celkový čas tisku	410 min (6:50 hod)
Spotřebovaný materiál modelu	61,723 cm ³
Spotřebovaný materiál podpor	18,562 cm ³

3.3.2 Tisk prototypu 3D tiskárnou Dimension uPrint

Jakmile byly nastaveny všechny požadované vlastnosti tisku, byla úloha zaslána z osobního počítače do tiskárny Dimension uPrint Obr. 3.9. Vlastnosti 3D tiskárny byly uvedeny v Tab. 3.4. Po provedení přenosu dat byla tiskárna připravena k tisku. Manuální potvrzení a start tisku bylo jako jediný úkon nutno provést přímo u samotného zařízení. Před samotným započetím tisku tiskárna provedla ohřátí pracovního prostoru na 74°C, což je teplota nezbytně nutná k provedení tisku. Jakmile bylo v tiskárně dosaženo provozní teploty, byl tiskárnou spuštěn proces tisku modelu. Materiál byl v trysce taven do polotekutého stavu na teplotu 293°C a poté byl připraven k tvorbě modelu. Před samotnou tvorbou modelu bylo tiskárnou nanášeno na pracovní podložku několik vrstev podpory, která sloužila jako základ pro nanášení dalších vrstev stavebního materiálu a umožnila snadnější oddělení modelu od podložky po dokončení tisku. Po nanášení základních vrstev podpory byl proveden tisk samotného modelu Obr. 3.10 [42].

Při stavbě modelu byl použit termoplast *ABSplus*, který je až o 40% pevnější než běžně používaný materiál ABS. Tato vlastnost umožňuje vytvářet silnější a stabilnější prototypy sloužící i k testování mechanických vlastností modelu. Pevnost materiálu v tahu *ABSplus* je 36 MPa. Použitelnost materiálu je do 82 °C [41].



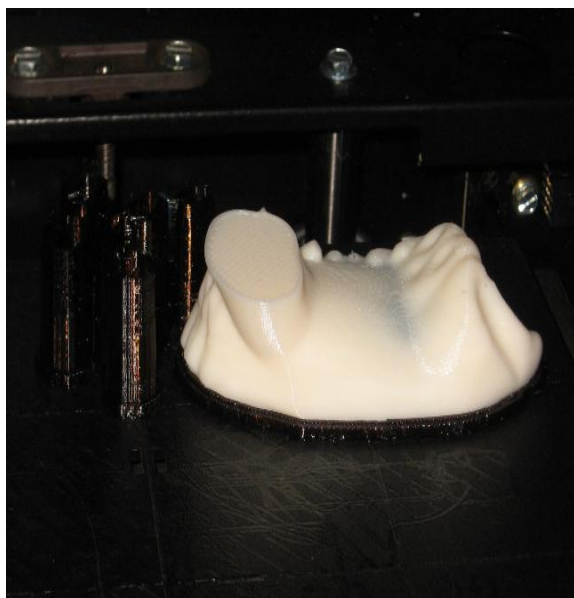
Obr. 3.9 Tiskárna Dimension uPrint.

Tab. 3.4 Technické údaje tiskárny Dimension uPrint [42].

Velikost modelovacího prostoru	203 x 152 x 152 mm
Modelovací materiál	ABS <i>Plus</i> plast v barvě slonovinové kosti
Tloušťka vrstev	0,254 mm
Objem kazet modelovacího materiálu a podpory	2 x 490 cm ³
Software	Catalyst
Kompatibilita	Windows 2000, XP, Vista, 7

Výhody tiskárny Dimension uPrint:

- využití technologie rozpustných podpor;
- pevné a netoxické modely;
- spolehlivost modelování;
- nízké provozní náklady;
- jednoduchá obsluha a instalace;
- cenová dostupnost;
- nízká hmotnost zařízení;
- práce v kancelářských podmínkách;
- nejmenší zařízení v řadě Dimension [42].



a)



b)

Obr. 3.10 a) Průběh tvorby modelu, b) Dokončený model.

3.4 Úprava modelu

Vytvořený model, který byl vyjmut z pracovního prostoru 3D tiskárny, byl pevně spojen s pracovní deskou. Dále byly k modelu přichyceny podpory, které bylo nutno odstranit. Nejdříve byly mechanicky odstraněny velké části podpor. K oddělení byly použity kleště, dláto a šroubovák, kterými byly podpory opatrně odstraněny od modelu, aby nedošlo k jeho poškození. Jako další způsob, kterým byly odstraněny menší části podpor, bylo vymytí podpor v ultrazvukové čističce P702 Obr. 3.11. Zařízení bylo naplněno speciálním rozpouštěcím roztokem, kterým byla součást omývána za pomoci ultrazvuku, což zapříčinilo oddělení modelu od zbytku podpor. Nastavení teploty urychlilo odstranění podpor. Teplota lázně se pohybovala od 20 do 80 °C.



a)



b)

Obr. 3.11 a) Model s podporami přichycený k základní desce, b) Odstranění zbytku podpor v ultrazvukové čističce P702.

Po odstranění podpor byl získán konečný model součásti, který byl plně shodný s předlohovým modelem stojanu na mobilní telefon. Jako další proces úpravy součásti byla provedena úprava povrchu modelu. Tato úprava byla nutná jak z estetického hlediska, tak z předpokladů dalšího využití modelu. Použití modelu v další fázi bylo vytvoření silikonové formy, která sloužila k výrobě prototypů. Tato technologie vyžadovala vysokou kvalitu povrchu součásti. Zkvalitnění povrchu modelu bylo provedeno nanesením tekutého tmelu ve spreji, který umožnil rovnoměrné a kvalitní pokrytí celého povrchu součásti Obr. 3.12. Tekutý tmel byl na součást nanášen po malých vrstvách, které bylo nutné nechat zaschnout nejméně 20 minut. Množství vrstev nanesených na součást bylo dáno tvarem modelu a množstvím naneseného tmelu. V případě prototypu stojanu na mobilní telefon bylo nanášeno 8 vrstev tekutého tmelu. Jakmile proběhlo nanesení poslední vrstvy tmelu, bylo nutné model nechat nejméně 24 hodin vyschnout, aby proběhlo dostatečné vytvrzení tmelu. Po vyschnutí bylo provedeno broušení ve vodní lázni jemným brousícím papírem, kterým byla zajištěna vysoká kvalita povrchu.



a)



b)

Obr. 3.12 a) Průběh nanášení vrstev tmelu na model, b) Hotový model po vybroušení.

3.5 Výroba silikonové formy

Při tvorbě silikonové formy byla velice důležitá volba dělicí roviny. Vzhledem k tvarové složitosti byla volba velice obtížná. Dělicí rovina byla zvolena v části nad stojanem v místech zápěstí modelu ruky. Každá část silikonové formy přitom byla vytvořena samostatně. Trvanlivost silikonové formy je dána především požadavky na přesnost modelu, ale také složitostí formy. Běžná životnost formy se pohybuje od 5 kusů přesných odlitků až do 30 - 40 kusů u odlitků, u kterých nejsou kladeny požadavky na přesnost. Trvanlivost formy stojanu na mobilní telefon byla odhadnuta na 20 kusů.

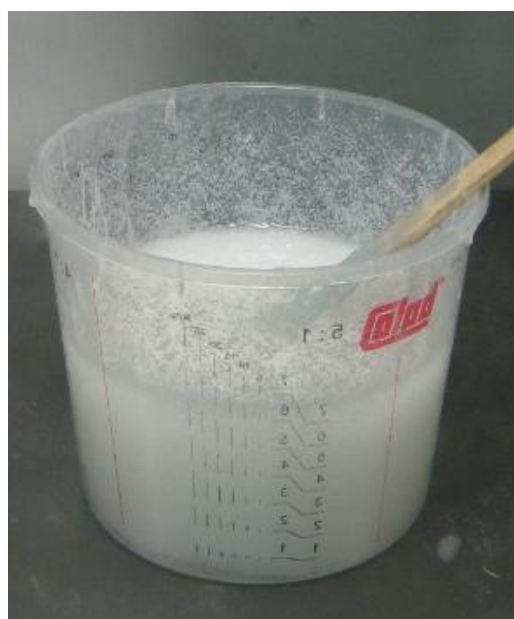
3.5.1 Výroba první části formy

Při vytváření první části formy bylo nejdříve sestaveno ohraničení z nařezaných tabulí skla, které byly tavnou lepicí pistolí slepeny dohromady. Model byl umístěn do vnitřního prostoru a následně zaformován plastelínou. Povrch plastelíny byl vyhlazen a poté byly do formy vytvořeny zámky, které mají funkci vzájemné stabilizace obou forem vůči sobě. Nezaformovaná část modelu byla následně zalita tekutým silikonem SILASTIC T-4, který byl smíchán v poměru 10:1 s tužidlem viz příloha P1. Směs silikonu a tužidla bylo nutno před odlitím formy umístit do vakuového lícího systému MK Mini Obr. 3.13. V tomto zařízení

proběhlo odstranění veškerého vzduchu z licí směsi, což zabránilo tvorbě bublin v silikonové formě. Celková doba vakuování trvala přibližně 5-10 minut.



a)



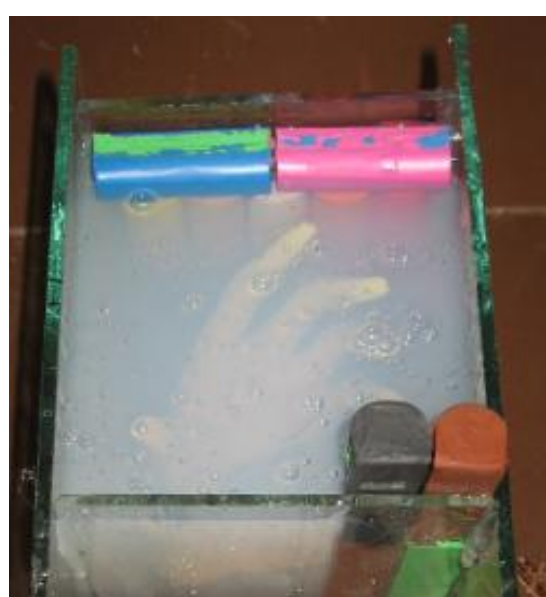
b)

Obr. 3.13 a) Vakuový licí systém MK Mini, b) Kelímek se směsí silikonu a tužidla.

Jakmile byla směs silikonu s tužidlem připravena, bylo provedeno zalití modelu Obr. 3.14. Vytvrzení formy proběhlo za pokojové teploty 20 °C po dobu přibližně 12 hodin. Vytvrzená první část silikonové formy byla následně oddělena od plastelíny a tabulí skla a připravena k výrobě druhé části silikonové formy.



a)



b)

Obr. 3.14 a) Zaformovaný model, b) Model zalitý silikonem.

3.5.2 Výroba druhé části formy

Výroba druhé části formy proběhla obdobně jako výroba části první Obr. 3.15. První část formy byla i s modelem ohraničena tabulemi skla, které tvořily vnější tvar formy. Model byl dále zaformován plastelínou a zalit silikonem. Průběh přípravy silikonu byl stejný jako u první části formy. Na modelu bylo dále nutno vytvořit tzv. komínek z plastelíny, který po vyjmutí sloužil jako lící otvor do silikonové formy.



a)

b)

Obr. 3.15 a) Příprava výroby druhé části silikonové formy, b) Zalití modelu silikonem.

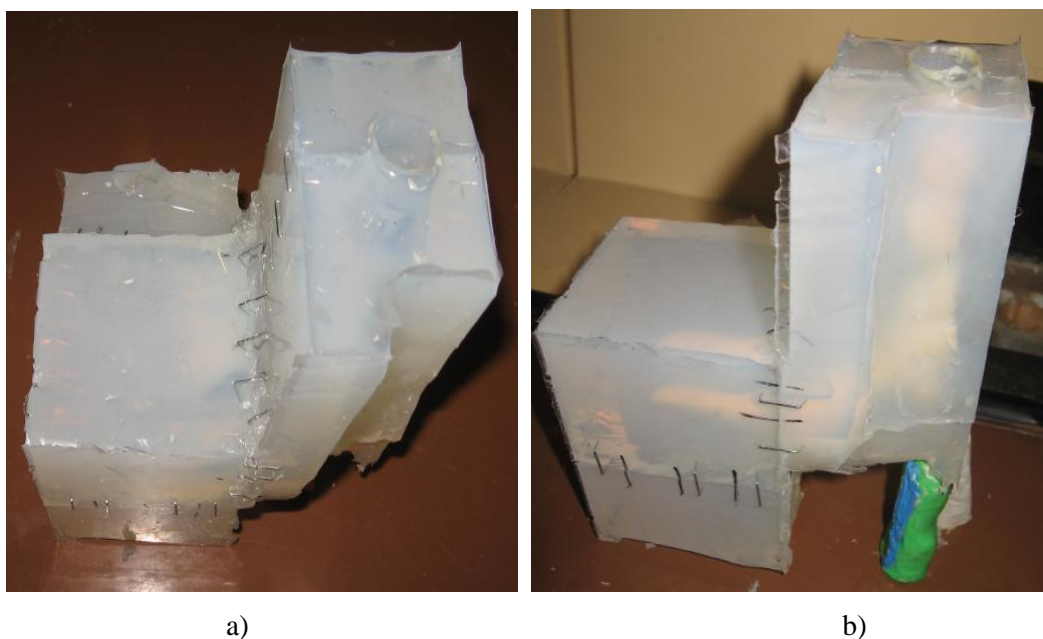
Jakmile byl vytvořen druhý model formy, byla odstraněna plastelína a stěny formy. Forma byla rozebrána a model vyjmut. Obě části formy bylo nutné následně rozdělit z důvodu vyjmutí složitě tvarovaného modelu. Silikonová forma byla následně připravena k odlití série prototypů z pryskyřice Obr. 3.16.



Obr. 3.16 Dokončené části silikonové formy

3.6 Odlití prototypu z pryskyřice

Před samotným odléváním bylo nutno jednotlivé díly formy složit dohromady Obr. 3.17. Důraz při sestavování formy byl kladen na přesné usazení všech částí formy. Jednotlivé silikonové části byly následně spojeny kovovými sponami, které zajistily stažení všech částí formy. Dělicí rovinu bylo nutno z důvodu propustnosti utěsnit tavicí pistolí. Dále byl do licího otvoru umístěn trychtýř, který umožnil snadnější vlití pryskyřice z licího kelímku do silikonové formy. Jako materiál byla použita polyuretanová pryskyřice ebalta SG 145 A, která je určena např. pro slévárenské modely jader. Pryskyřice ebalta SG 145 A byla před odlitím smíchána s tužidlem ebalta SG 145 B v poměru 1:1. Promíchání pryskyřice a tužidla bylo nutno provést důkladně po dobu asi 5 minut. Technický návod pryskyřice a plniva viz příloha P2, P3. Spotřeba materiálu potřebného k odlití prototypu stojanu na mobilní telefon je uvedena v Tab. 3.5.



Obr. 3.17 a) Složená silikonová forma, b) Odlití prototypu do silikonové formy

Tab. 3.5 Spotřeba materiálu

Pryskyřice ebalta SG 145 A	70 ml
Tužidlo ebalta SG 145 B	70 ml
Celková spotřeba materiálu	140 ml

Odlití pryskyřicového modelu je nutno provést co nejrychleji z důvodu rychlého tuhnutí směsi pryskyřice a tužidla. Odlití prototypu proběhlo postupně, z důvodu správného zaběhnutí materiálu. Nejprve byla do formy nalita polovina materiálu, následně proběhlo naklopení formy tak, aby pryskyřice zaběhla i do konců prstů a došlo k jejich vyplnění. Tímto bylo zajištěno úplné vyplnění všech míst a nebylo nutno provést odvdzušnění modelu pomocí navrtání formy nebo zavedení odvdzušňovacích kanálků. Jakmile proběhlo vyplnění všech prstů modelu, byla nalita do formy druhá polovina materiálu. Odlitý pryskyřicový model v silikonové formě bylo nutno nechat nejméně 12 hodin ztuhnout. Po ztuhnutí pryskyřice byly odstraněny kovové spony, které spojovaly jednotlivé části formy. Rozložení formy bylo nutno provést s opatrností a s ohledem na poškození silikonové formy Obr. 3.18.



a)

b)

Obr. 3.18 a) Průběh rozkládání silikonové formy, b) Rozložená silikonová forma s modelem.

3.7 Konečná úprava modelu

Model po vyjmutí z formy vyžadoval několik dokončovacích úprav:

- odstranění nálitku;
- obroušení otřepů;
- povrchová úprava modelu.

Po vyjmutí odlitého modelu bylo nejdříve nutno provést odstranění nálitku. Odstranění bylo provedeno pilkou a povrch modelu pod nálitkem byl zbroušen. Další operaci tvořilo obroušení modelu jemným smirkovým papírem. Tímto byly odstraněny veškeré nerovnosti na povrchu modelu, zejména otřepy vzniklé v oblasti dělicích rovin. Poslední část úpravy modelu bylo provedení barvení a lakování prototypu. Jako barva byla vybrána výrazná červená barva, která byla nanесena na povrch modelu pomocí nástřiku několika vrstev rychleschnoucí barvy ve spreji. Po dokončení všech těchto úprav byl vytvořen prototyp stojanu na mobilní telefon Obr. 3.19.



a)



b)

Obr. 3.19 a) Vytvořený prototyp stojanu na mobilní telefon, b) Použití prototypu.

4 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

V této kapitole bude shrnuta výroba prototypu metodou FDM a technologií odlévání do silikonové formy (Soft Tooling). Obě varianty budou zhodnoceny jak z technologického hlediska, tak i z ekonomického hlediska, kdy budou vyčísleny výrobní náklady.

4.1 Výroba prototypu metodou Fused Deposition Modeling

Tvorba modelu metodou FDM proběhla na tiskárně Dimension uPrint. Jako materiál byl použit termoplast *ABSplus*. Jde o profesionální tiskárnu, která umožní rychlou a dostatečně přesnou tvorbu modelu. Tisk modelu tiskárnou uPrint byl proveden bez problémů a celkový čas tisku byl 6 hodin a 50 minut.

4.1.1 Náklady na tisk modelu stojanu na mobilní telefon

Objem použitého materiálu byl generován systémem CatalystEX Tab. 4.1. Cena tisku materiálu je stanovena FSI VUT v Brně na 14,50 [Kč/ cm³].

Tab. 4.1 Množství použitého materiálu pro stavbu modelu

ABSplus	61,723 cm ³
Materiál podpor	18,562 cm ³
Celkem	80,285 cm ³

Celkové materiálové náklady na tisk modelu byly spočteny podle vztahu (4.1)

$$N_m = O_m \cdot C_m \quad (4.1)$$

kde: N_m [Kč] - náklady na tisk modelu,
 O_m [cm³] - objem spotřebovaného materiálu,
 C_m [Kč·cm⁻³] - cena spotřebovaného materiálu.

$$N_m = 80,285 \cdot 14,5 = 1164 \text{ Kč}$$

4.2 Materiálové náklady na výrobu silikonové formy

Forma byla vyrobena ze silikonu SILASTIC T-4, který byl smíchán s tužidlem v poměru 10:1. Cena obou složek byla stanovena 726 Kč/kg. Celkový spotřebovaný materiál pro tvorbu všech částí silikonové formy byl 1,2 kg.

Celkové materiálové náklady na výrobu silikonové formy byly spočteny podle vztahu (4.2)

$$N_s = H_s \cdot C_s \quad (4.2)$$

kde: N_s [Kč] - náklady na výrobu formy,
 H_s [kg] - hmotnost spotřebovaného materiálu,
 C_s [Kč·kg⁻¹] - cena spotřebovaného silikonu.

$$N_s = 1,2 \cdot 726 = 871 \text{ Kč}$$

4.3 Materiálové náklady na výrobu modelu odlitím

Model byl odlit z pryskyřice ebalta SG 145 A smíchané s tužidlem ebalta SG 145 B v poměru 1:1. Cena pryskyřice i cena tužidla byla stanovena 196 Kč/kg. Množství použitého materiálu bylo 140 ml, což při hustotě směsi 1 kg/dm³ činí 0,14 kg.

Celkové materiálové náklady na odlití modelu byly spočteny podle vztahu (4.3)

$$N_p = H_p \cdot C_p \quad (4.3)$$

kde: N_p [Kč] - náklady na odlití modelu,
 H_p [kg] - hmotnost spotřebovaného materiálu,
 C_p [Kč·kg⁻¹] - cena směsi pryskyřice a tužidla.

$$N_s = 0,14 \cdot 196 = 27 \text{ Kč}$$

4.4 Celkové náklady na výrobu modelu odlitím

Celkové materiálové náklady pro výrobu jednoho modelu odléváním byly spočteny podle vztahu (4.4)

$$N_c = N_m + N_s + N_p \quad (4.4)$$

kde: N_c [Kč] - celkové náklady na jeden odlitý model,
 N_m [Kč] - náklady na tisk modelu,
 N_s [Kč] - náklady na výrobu formy,
 N_p [Kč] - náklady na odlití modelu.

$$N_c = 1164 + 871 + 27 = 2062 \text{ Kč}$$

4.5 Porovnání nákladů pro série vyráběné technologií Rapid Prototyping a odléváním.

Trvanlivost silikonové formy je stanovena na 20 kusů odlitků. Výpočty nákladů porovnávacích sérií byly provedeny pro 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 20 kusů. Výsledky byly zaneseny do Tab. 4.2 a znázorněny v grafu Obr. 4.1 a Obr. 4.2.

Celkové náklady na výrobu sérií modelů odléváním byly spočteny podle vztahu (4.5)

$$N_{OD} = N_m + N_s + N_p \cdot n \quad (4.5)$$

kde: N_{OD} [Kč] - celkové náklady na odlití série modelů,
 N_m [Kč] - náklady na tisk modelu,
 N_s [Kč] - náklady na výrobu formy,
 N_p [Kč] - náklady na odlití modelu,
 n [-] - počet vyrobených kusů.

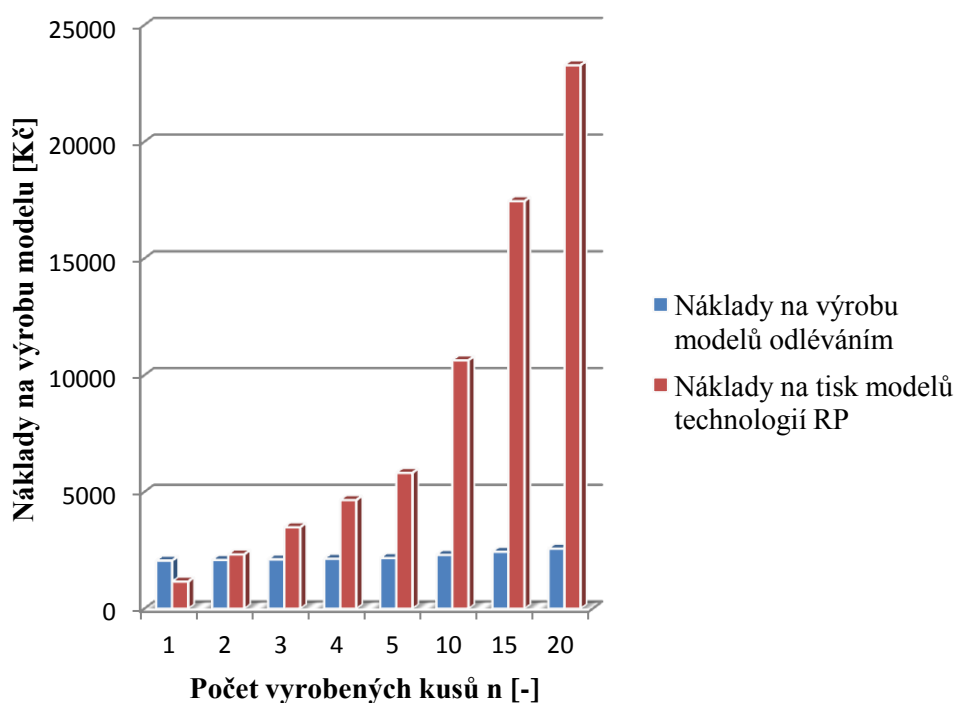
Celkové náklady na výrobu sérií modelů technologií RP byly vypočteny podle vztahu (4.6)

$$N_{RP} = N_m \cdot n \quad (4.6)$$

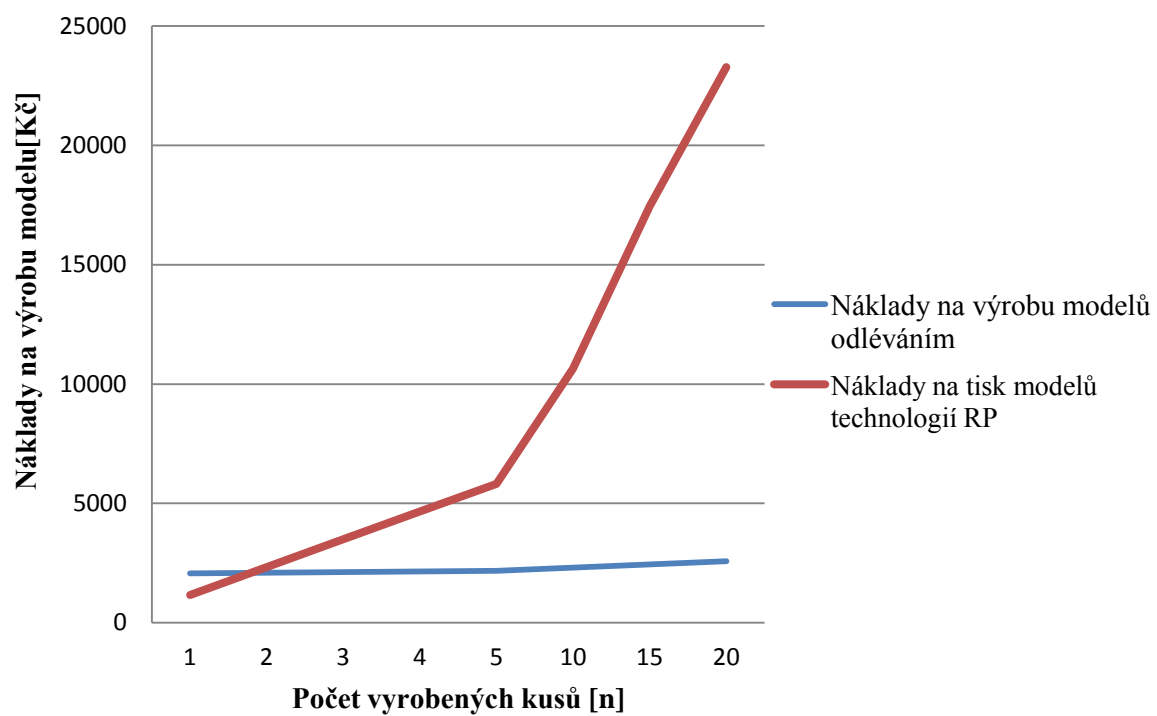
kde: N_{RP} [Kč] - náklady na tisk série modelů,
 N_m [cm³] - náklady na tisk modelu,
 n [-] - počet vyrobených kusů.

Tab. 4.2 Porovnání nákladů na výrobu sérií modelů

Počet vyrobených kusů n [-]	Náklady na výrobu modelů odléváním N_{OD} [Kč]	Náklady na tisk modelů technologií RP N_{RP} [Kč]
1	2062	1164
2	2089	2328
3	2116	3492
4	2143	4656
5	2170	5 820
10	2305	11 640
15	2440	17 460
20	2575	23 280



Obr. 4.1 Porovnání nákladů na výrobu modelů odléváním a technologií RP.



Obr. 4.2 Porovnání nákladů sloužící k volbě metody tvorby prototypů.

5 DISKUSE

Tato kapitola obsahuje souhrn výsledků použitých moderních technologií k výrobě prototypových součástí. Dále jsou zhodnoceny klady a zápory použitých technologií a perspektiva k využití na trhu.

5.1 Získání dat 3D skenováním

Získání dat za pomoci 3D skeneru proběhlo bezproblémově, rychle a s dostatečnou přesností. Technologie 3D skenování modelu umožnila získat přesný tvar modelu bez jakéhokoli pracného modelování. Model stojanu na mobilní telefon v podobě lidské ruky nebylo možno získat jinou alternativní technologií než 3D skenováním, jako náhradní možnost získání modelu se jevílo vytvoření 3D modelu v některém modelářském programu. Tato varianta by však přinesla několikanásobně větší časovou náročnost, vyžadovala by kvalitní 3D modelářský program a výborné modelářské schopnosti. I za předpokladů splnění všech těchto podmínek by nebylo možné dosažení přesnosti a shodnosti s prvotním modelem v porovnání s použitou technologií 3D skenování. Při tvorbě prototypu nebylo nutno použít žádnou technickou dokumentaci či vytvářet složité rozkreslení modelu. Technologie 3D skenování modelů je velice praktická technologie, která výrazně zjednodušuje a urychluje práci nejen konstruktérů, ale i designérů a pracovníků v nejrůznějších profesích. Tato technologie skrývá velký potenciál využití a je jen otázkou času, kdy nalezne široké uplatnění v praxi.

5.2 Zhodnocení tvorby modelu technologií Rapid Prototyping

Získání modelu technologií RP bylo provedeno na moderní 3D tiskárně Dimension uPrint. Tato technologie umožnila rychlou a přesnou stavbu modelu téměř bez odpadového materiálu. Technologie tisku modelu je velice produktivní a přesná. Využití možnosti výroby i složitých součástí bylo ověřeno na modelu stojanu na mobilní telefon. Tato technologie je poměrně mladá a její využití v praxi je zatím pouze pro výrobu jednotlivých prototypů. Jejím širšímu využití brání zejména vysoké pořizovací náklady, vysoká cena údržby a cena materiálu. Tyto aspekty jí znevýhodňují ve srovnání s ostatními metodami tvorby modelů. V případě technologií RP jde však o novou moderní technologii, která se neustále zdokonaluje a vyvíjí. V případě snížení provozních nákladů, zejména ceny materiálu a zrychlení tvorby modelu je možné předpokládat vyšší konkurenceschopnost 3D tiskáren a tím i jejich široké využití nejen v technické praxi, ale i v mnoha dalších oborech.

5.3 Zhodnocení výroby prototypu odlitím do silikonové formy

Hlavní výhodou silikonové formy je její pružnost. Díky této vlastnosti bylo možno provést vyjmutí modelu i s tvarově složitými částmi. Tato vlastnost se stala klíčovou při tvorbě prototypu stojanu na mobilní telefon, kdy bylo nutné vyjmutí složitých tvarových prvků (prstů ruky) ze silikonové formy. Vyjmutí takto složitého modelu z jiných typů forem, např. pískové či kovové, by v daném případě bylo problematické. Tato výhoda představuje současně i nevýhodu formy při jejím zpětném sestavení. V případě použití silikonové formy jsou jednotlivé díly pružné, což při sestavování formy z více dílů způsobuje problémy s dodržením přesnosti a těsnosti formy. Při sestavování silikonové formy z více částí je tedy nutné, aby všechny její díly na sebe přesně doléhaly. Při správném sestavení formy nevznikají otřepty v oblasti dělicí roviny a nedochází k propouštění pryskyřice z vnitřní dutiny.

5.3.1 Návrh úpravy silikonové formy

Před samotnou výrobou formy je nutno pečlivě zvážit umístění dělicí roviny. Jako hlavní kritérium musí být zohledněno vyjmutí modelu z formy. Dalším kritériem by měla být výroba formy z co nejmenšího počtu dílů. Ideálně vytvořená forma by měla mít 2 díly, tedy pouze jednu dělicí rovinu. V případě výroby silikonové formy z více dílů (3-4) může docházet k problémům při zpětném sestavování. Forma prototypu stojanu na mobilní telefon byla zhotovena ze čtyř silikonových dílů, což způsobovalo problémy při zpětném sestavování formy. V případě složitých modelů, které by bylo nutno vytvořit z více částí, je vhodné zvážit použití alternativních technologií jako např. lití do skořepinové formy.

Další úpravou formy, vedoucí ke zvýšení přesnosti výsledného modelu, je vytvoření vodících zámků. Vodicí zámký zajistí přesnější dosedání částí silikonové formy a tím i přesnost modelu. První způsob vytvoření vodících zámků je přímo v silikonové formě, kdy je zámek součástí obou dílů silikonové formy. Dalším způsobem vyztužení formy by mohlo být zavedení kovových či plastových středících sloupků, které by bylo možno umístit dodatečně do již vytvořené silikonové formy. Tato úprava by formu vyztužila a zpevnila, což by mělo za následek zvýšení tuhosti a tím i přesnosti formy.

ZÁVĚR

Bakalářská práce byla zvolena z důvodu ověření použitelnosti moderních metod pro realizaci výroby stojanu na mobilní telefon. Přehledy technologií Reverse Engineering a Rapid Prototyping byly uvedeny v teoretické části práce. Dále zde byly tyto technologie popsány, uvedeny možnosti, výhody a nevýhody a možnosti využití v praxi. Ověření použitelnosti technologie 3D skenování proběhlo úspěšně i na tvarově složité součásti. Data získána touto technologií jsou plně využitelná nejen pro další úpravu, ale i pro rychlou tvorbu prototypů. Využitelnost 3D skenerů je široká a je možná aplikace této technologie do nejrůznějších oborů lidské činnosti. Ověřením předností technologie, mezi které patří rychlost, přesnost a variabilita bylo potvrzeno v experimentální části práce. Budoucí zastoupení této technologie je nepochybné, nejen v technické praxi. Získání dat a ověření funkčnosti 3D skeneru bylo provedeno ve spolupráci s firmou MCAE Systems, s.r.o., která disponuje moderním skenovacím zařízením ATOS II a bohatými zkušenostmi s technologií skenování objektů. Výsledkem byl 3D model součásti ve formátu *.stl, který je dostačující pro výrobu modelu pomocí 3D tiskárny uPrint. V případě nutnosti úpravy modelu by bylo nutné převést data pomocí 3D softwaru na objemový model, z důvodu nevhodnosti formátu *.stl. Tato úprava však nebyla nutná. Celková doba přípravy, skenování a úpravy dat modelu trvala pouhých 40 minut. Doba vynaložená na modelování takto složité součásti v modelářském programu by mohla trvat až několik dní. Využití dané technologie představuje značnou úsporu času a tím i vynaložených prostředků. Dále byl v práci popsán a ověřen princip navazující technologie Rapid Prototyping, která je v zásadě odlišná od jiných běžných metod výroby modelů. Jde tedy o aditivní technologii, která je schopna vytvořit prototyp ve velice krátkém čase, s dostačující přesností a s využitím široké škály materiálů. Tato technologie byla v práci aplikována pro výrobu modelu stojanu na mobilní telefon. Tisk modelu byl proveden metodou Fused Deposition Modelig tiskárnou Dimension uPrint, kterou vlastní FSI VUT v Brně. Tisk součásti proběhl bez problémů a nedošlo k žádnému poškození či hroucení vytvářeného modelu. Výsledek tisku byl kvalitní a zcela splnil očekávání od použité technologie. Tvorba prototypu trvala 6 hodin 50 minut, což ve srovnání s ostatními technologiemi je velice rychlá metoda získání prototypu. Ověřením předností byla potvrzena využitelnost v praxi, které doposud brání pouze vysoká pořizovací cena zařízení a poměrně vysoká cena materiálů dodávaných výhradně od společností distribuuujících tato zařízení. Jako alternativa výroby byla použita technologie odlévání do silikonové formy. Forma byla vytvořena ze silikonu, který má pružné vlastnosti, klíčové k tvorbě tvarově složitého modelu. Vzhledem k tvarové složitosti vytvářeného prototypu a možnosti vyjmutí odlévaného modelu z formy bylo nutno silikonovou formu zhotovit ze čtyř dílů. Tato strategie se však díky vlastnostem silikonu nejevila jako ideální. Ačkoli vytvoření formy, její sestavení a přesné usazení bylo složité, výsledný model plně vyhovoval kladeným požadavkům. Díky menším úpravám byl odlitý model shodný s předlohovým modelem a plně použitelný např. k prezentačním či jiným účelům. Na závěr práce bylo provedeno technicko-ekonomické zhodnocení výroby použitými technologiemi. Výsledek technicko-ekonomického zhodnocení ukazuje, že ačkoli náklady na výrobu formy jsou vyšší než na tisk modelu, při výrobě dvou a více kusů prototypů je cenově výhodnější provést odlití prototypů do silikonové formy. Při výrobě více kusů metoda odlití do silikonové formy, ve srovnání s tiskem modelu technologií Rapid Prototyping, přinese až několikanásobné úspory nákladů.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] PÍŠKA, M. a kolektiv. *Speciální technologie obrábění*. CERM 1.vyd. 246 s. 2009. ISBN 978-80-214-4025.
- [2] SLOTA, J., MANTIČ, M., GAJDOŠ, I. *Rapid Prototyping a Reverse Engineering v strojárstve*. Košice: Edícia študijnej literatúry, 2010. ISBN 978-80-553-0548-6.
- [3] PÍŠA, Z., KEJDA, P., GÁLOVÁ, D. *Rapid Prototyping in Mechanical Engineering*. In Proceedings of the Abstracts 12th International Scientific Conference CO-MA-TECH 2004. Bratislava: STU, 2004. s. 160. ISBN 80-227-2121-2.
- [4] SEDLÁK, J., PÍŠA, Z. *Rapid Prototyping master modelu pomocí CAD/CAM systému*. In Mezinárodní vědecká konference 2005. Ostrava: VŠB TU Ostrava, Fakulta strojní, 07.09.2005-09.09.2005. 30 s. ISBN: 80-248-0895-1.
- [5] TMS (The Minerals, Metals & Materials Society): *Rapid Prototyping of Materials*. The Minerals, Metals & Materials Society. 2002, pp. 615. ISBN 0873395301.
- [6] SolidVision: Reverzní inženýrství. [Http://www.solidvision.cz/reverzni-inzenyrstvi/](http://www.solidvision.cz/reverzni-inzenyrstvi/) [online]. 2012 [vid. 2012-03-01]. Dostupné z: <http://www.solidvision.cz/reverzni-inzenyrstvi/>
- [7] Wikipedie. *Reverzní inženýrství* [online]. 2006 [vid. 2012-03-01]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Reverzn%C3%AD_in%C5%BEn%C3%BDrstv%C3%AD
- [8] MM průmyslové spektrum. *Reverzní inženýrství, digitalizace a výroba forem* [online]. 2012 [vid. 2012-03-01]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/reverzni-inzenyrstvi-digitalizace-a-vyroba-forem.html>
- [9] ROZSÍVAL, J. *Využití reverzního inženýrství pro výpočty aerodynamiky automobilu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 75 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Petr Porteš, Ph.D.
- [10] EIS, J. *Technologie výroby kopie osobního automobilu pomocí digitalizace*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 87 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Josef Sedlák, Ph.D.
- [11] NAVRÁTIL, Robert. *Reverse Engineering v praxi*. [online]. 2000 [vid. 2012-05-08]. Dostupné z: <http://robo.hyperlink.cz/re-praxe/>
- [12] MCAE. *3D digitalizace* [online]. 2012 [vid. 2012-03-01]. Dostupné z: <http://www.mcae.cz/3d-digitalizace>.
- [13] ZELENÝ, Petr. *Teorie bezkontaktního měření rozměrů*. In: [online]. 2009 [vid. 2012-05-08]. Dostupné z: http://intech2.tul.cz/dokumenty/vystupy_z_projektu/03~TUL%20-%20KI%C3%AD%C4%8Dov%C3%A1%20aktivita%203/In-TECH%20_KA3-p%C5%99edn%C3%A1%C5%A1ka%20Teorie%20bezkontaktn%C3%ADho%20m%C4%9B%C5%99en%C3%AD%20rozm%C4%9Br%C5%AF.pdf
- [14] MM průmyslové spektrum. *Digitalizace* [online]. 2004 [vid. 2012-03-05]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/digitalizace-jeji-princip-a-rozdeleni.html>
- [15] SolidVision. *3D skenery* [online]. 2012 [vid. 2012-03-05]. Dostupné z: <http://www.solidvision.cz/3d-skenery/>

- [16] DRÁPALA, Miroslav. *Rapid Prototyping (RP) & Reverse Engineering (RE)*. In: [online]. [vid. 2012-05-03]. Dostupné z: <http://old.uk.fme.vutbr.cz/kestazeni/ZRI/RE.pdf>
- [17] Breaking new grounds in ecological architecture. In: *Materialise* [online]. [vid. 2012-03-05]. Dostupné z: <http://www.materialise.com/materialise/view/en/1323994-Innovative+habitation+methods+with+the+help+of+Mimics.html>
- [18] SKOUPÝ, P. *3D optické měřicí a skenovací systémy pro strojírenství*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2007. 64 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. David Paloušek.
- [19] NAJDÁREK, L. *Metody 3D laserového skenování obrobků ve výrobním procesu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 52 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Miroslav Opl.
- [20] NAVRÁTIL, Robert. 3D Digitalization & Reverse Engineering. [online]. [vid. 2012-05-03]. Dostupné z: <http://robo.hyperlink.cz/re-teorie/main04.html>
- [21] Thome-praezision: 3-D Souřadnicové měřicí přístroje. [online]. [vid. 2012-05-03]. Dostupné z: <http://www.thome-praezision.cz/pdfcz/katalog-cz.pdf>
- [22] NAVRÁTIL, Robert. 3D Digitalization & Reverse Engineering. [online]. [vid. 2012-05-03]. Dostupné z: <http://robo.hyperlink.cz/re-teorie/main05.html>
- [23] MAČÁK, Josef. MCAE: Optický skener ATOS. [online]. [vid. 2012-05-03]. Dostupné z: <http://www.mcae.cz/data/files/atos-final-25.pdf>
- [24] MCAE: Atos. [online]. 2012 [vid. 2012-05-03]. Dostupné z: <http://www.mcae.cz/atos>
- [25] MCAE: Tritop. [online]. 2012 [vid. 2012-05-03]. Dostupné z: <http://www.mcae.cz/tritop>
- [26] SLÁMA, Jakub. Měření laserovým 3D skenerem. [online]. [vid. 2012-05-07]. Dostupné z: <http://stc.fs.cvut.cz/pdf11/1100079-1.pdf>
- [27] Strojírenství: 3D skenování. [online]. 2009 [vid. 2012-05-07]. Dostupné z: <http://www.cad.cz/strojirenstvi/38-strojirenstvi/2851-3d-skenovani.html>
- [28] DesignTech: Připravujeme data pro Rapid Prototyping. [online]. 2005 [vid. 2012-05-07]. Dostupné z: <http://www.designtech.cz/c/cad/pripavujeme-data-pro-rapid-prototyping.htm>
- [29] RepRap: Mendel. [online]. [vid. 2012-05-07]. Dostupné z: <http://reprap.org/wiki/Mendel>
- [30] MM Průmyslové spektrum: Technické novinky. [online]. 2010 [vid. 2012-05-07]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/novinka/vedci-vytiskli-lidskou-zilu-pomoci-3d-tiskarny-a-biologickeho-inkoustu.html>
- [31] REJŽEK, Jan. *Konstrukce a výroba podvozku rádiem řízeného modelu auta s využitím moderních technologií: Bakalářská práce*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 46 s. Vedoucí práce Ing. Josef Sedlák, Ph.D.
- [32] MM Průmyslové spektrum: Aplikace technologií Rapid Prototyping. [online]. 2001 [vid. 2012-05-07]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/aplikace-technologiei-rapid-prototyping.html>
- [33] Protocom: protoplastic. [online]. 2008 [vid. 2012-05-07]. Dostupné z: <http://www.protocom.cz/sluzby/3d-modely/protoplastic-1/>

[34] BARCUCH, Jakub. *Název: Využití moderních technologií při výrobě lopatek rybářských návnad*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 46 s., Ing. Josef Sedlák, Ph.D.

[35] EnvisionTEC: 3D model gallery. [online]. 2011 [vid. 2012-05-08]. Dostupné z: <http://www.envisiontec.de/index.php?page=resources&func=model&p=2>

[36] MM Průmyslové spektrum: Nekonvenční metody obrábění. [online]. 2008 [vid. 2012-05-07]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-9-dil.html>

[37] 3D systems: Materials. [online]. 2012 [vid. 2012-05-07]. Dostupné z: <http://production3dprinters.com/materials/sls>

[38] DIRECT METAL LASER SINTERING: Prototypové díly technologií DMLS. [online]. [vid. 2012-05-08]. Dostupné z: <http://www.dmls.cz/>

[39] CAM-LEM: The CAM-LEM Process. [online]. 2005 [vid. 2012-05-08]. Dostupné z: <http://www.camlem.com/camlemprocess.html>

[40] Replicator: Solido–3D Printer. [online]. 2010 [vid. 2012-05-08]. Dostupné z: <http://replicatorinc.com/blog/2010/02/solido-2950-3d-printer/>

[41] Stratasys: ABSplus. In: [online]. 2007 [vid. 2012-05-08]. Dostupné z: <http://www.dimensionprinting.ru/Download/ABSplus.pdf>

[42] MCAE: Dimension uPrint. [online]. 2012 [vid. 2012-05-08]. Dostupné z: <http://www.mcae.cz/dimension-uprint>

[43] CatalystEX 4.0.1®, ©2010 Stratalys Inc. Eden Prairie, MN. Všechna práva vyhrazena [online]. [vid. 2012-04-12] Dostupné z: <http://www.dimensionprinting.com/applications/rapid-prototyping.aspx>.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratka	Jednotka	Popis
ABS	-	Akrylonitrilbutadienstyren – označení plastu používaného v 3D tiskárnách
ATOS	-	Advanced Topometric Sensor – označení optického skeneru
CAD	-	Computer Aided Design - počítačem podporované navrhování
CAM	-	Computer Aided Manufacturing - počítačem podporovaná výroba
CNC	-	Computer Numerical Control – označení číslicově řízeného stroje
DMLS	-	Direct Metal Laser Sintering - označení technologie RP
FDM	-	Fused Deposition Modeling - označení technologie RP
LOM	-	Laminated Object Manufacturing – označení technologie RP
MJM	-	Multi Jet Modeling - označení technologie RP
NC	-	Numerical Control – všeobecné označení číslicově řízeného stroje
např.	-	Například
PC	-	Personal Computer – osobní počítač
RE	-	Reverse Engineering – reverzní (zpětné) inženýrství
RP	-	Rapid Prototyping – rychlá výroba prototypů
SGC	-	Solid Ground Cutting - označení technologie RP
SLA	-	Stereolithography – stereolitografie - označení technologie RP
SLS	-	Selective Laser Sintering - označení technologie RP
*.stl	-	Označení výměnného datového formátu
tzv.	-	Takzvaný
UV	-	Ultra Violet – ultra fialová
viz	-	Odkaz na stránku
2D	-	Two Dimensional „dvourozměrný“
3D	-	Three Dimensional „trojrozměrný“

Symbol	Jednotka	Popis
ρ	$[\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}]$	Hustota
H_s	$[\text{kg}]$	Hmotnost spotřebovaného materiálu
C_m	$[\text{Kč}\cdot\text{cm}^{-3}]$	Cena spotřebovaného materiálu
C_p	$[\text{Kč}\cdot\text{kg}^{-1}]$	Cena směsi pryskyřice a tužidla
C_s	$[\text{Kč}\cdot\text{kg}^{-1}]$	Cena spotřebovaného silikonu
N_c	$[\text{Kč}]$	Celkové náklady na jeden odlitý model
N_m	$[\text{Kč}]$	Náklady na tisk modelu
N_{OD}	$[\text{Kč}]$	Celkové náklady na odlití série modelů
N_p	$[\text{Kč}]$	Náklady na odlití modelu
N_{RP}	$[\text{Kč}]$	Náklady na tisk série modelů
N_s	$[\text{Kč}]$	Náklady na výrobu formy
O_m	$[\text{cm}^3]$	Objem spotřebovaného materiálu
n	$[-]$	Počet vyrobených kusů

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 (P1) Silastic T-4: Silikonkaučuková vysokopevnostní tepelně odolná hmota.
Příloha 2 (P2) Elba SG 145: Vysokopevnostní lící polyuretanová pryskyřice, neplněná.
Příloha 3 (P3) Plniva pro pryskyřici SG 145.

